



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



YURI MARCELLO REIS

**NOVAS POLÍTICAS PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DA
MOVIMENTAÇÃO DO CARRO TRIPPER: CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO
TRANSBORDO DOS SILOS E ECONOMIA DE ENERGIA**

JOÃO MONLEVADE

2022

YURI MARCELLO REIS

**NOVAS POLÍTICAS PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DA
MOVIMENTAÇÃO DO CARRO TRIPPER: CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO
TRANSBORDO DOS SILOS E ECONOMIA DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientadora: Prof. Monica do Amaral

Coorientador: Eduardo Sanches da Silva Filho

JOÃO MONLEVADE

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375n Reis, Yuri Marcello.

Novas políticas para o problema de otimização da movimentação do carro tripper [manuscrito]: considerações a respeito do transbordo dos silos e economia de energia. / Yuri Marcello Reis. - 2022.
32 f.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica do Amaral.

Coorientador: Me. Eduardo Sanches da Silva Filho.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Otimização matemática. 2. Pesquisa operacional. 3. Silos. I. Amaral, Mônica do. II. Silva Filho, Eduardo Sanches da. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 519.8

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Yuri Marcello Reis

Novas políticas para o problema de otimização da movimentação do carro tripper: considerações a respeito do transbordo dos silos e economia de energia

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovada em 25 de Outubro de 2022

Membros da banca

Dra. Mônica do Amaral - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Eduardo Sanches da Silva Filho - Coorientador (Universidade Federal de São Carlos)
Dr. Alexandre Xavier Martins - Avaliador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Tatiana Alves Costa - Avaliadora (Universidade Federal de Ouro Preto)

Mônica do Amaral, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/10/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Monica do Amaral, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/10/2022, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0419621** e o código CRC **1BD19008**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por me proporcionar perseverança e iluminar minha vida. Aos meus pais, José Roberto e Charlene, os maiores exemplos de pessoas e profissionais, por todo apoio e dedicação nesses anos. As minhas irmãs, Rayanne e Mayara, por acreditarem nesse sonho. Aos meus amigos e irmãos da República PCC, obrigado por estarem por perto nos bons e maus momentos. Esse trabalho só foi possível graças à minha orientadora, Mônica, obrigado pela paciência, companheirismo e dedicação. Agradeço ao Eduardo pelo apoio na construção deste trabalho. Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto, professores e funcionários, a dedicação na realização de suas atividades foi essencial no meu processo de formação profissional e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso. A todos que participaram, direta ou indiretamente do meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo desses anos. Muito obrigado a todos.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma
coisa e esperar resultados diferentes”.

(Albert Einstein)

RESUMO

O tripper é um equipamento usado para distribuir minério entre os compartimentos dos silos durante o processo de beneficiamento. A otimização da movimentação do carro tripper é o problema estudado neste trabalho, com a proposição de quatro novas políticas para o problema. O sequenciamento é feito pela definição do posicionamento do carro tripper ao longo do tempo, sendo este trabalho o primeiro que trata simultaneamente de três critérios de otimização na função objetivo: o esvaziamento, o transbordo e a economia de energia. As políticas alternativas propostas foram comparadas com outras políticas mencionadas na literatura. Mais de 300 testes, usando 45 instâncias, foram realizados e os resultados foram analisados quanto ao tempo de execução, ao comportamento dos níveis dos silos e o número de movimentos do carro tripper. Os resultados mostraram a importância de se testar novas políticas, bons resultados foram obtidos para a minimização do nível máximo dos silos, em todos os períodos, que mostrou grande rapidez no processamento e a política que busca, ao mesmo tempo, a maximização do menor nível e minimização do maior nível e dos números de movimentos do carro tripper, que mostrou ser possível levar em consideração simultaneamente o equilíbrio dos níveis quanto a economia de energia.

Palavras-chave: Tripper, Pesquisa Operacional, sequenciamento.

ABSTRACT

The tripper is an equipment used to distribute ore between the compartments of the silos during the beneficiation process. The optimization of tripper car movement is the problem studied in this work, with the proposition of four new policies for the problem. The sequencing is done by defining the tripper car positioning over time, and this work is the first to deal simultaneously with three optimization criteria in the objective function: emptying, overflow and energy savings. The proposed alternative policies were compared with other policies mentioned in the literature. More than 300 tests, using 45 instances, were performed and the results were analyzed regarding execution time, behavior of silo levels and the number of tripper car movements. The results showed the importance of testing new policies, good results were obtained for minimizing the maximum level of silos, in all periods, which showed great speed in processing and the policy that seeks, at the same time, to maximize the lowest level and minimization of the highest level and number of tripper car movements, which showed that it is possible to simultaneously consider the balance of levels in terms of energy savings.

Keywords: tripper, operational research, sequencing.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivos.....	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	Justificativa do trabalho.....	12
1.3	Estrutura do trabalho.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Política de Caldas e Martins (2018).....	14
2.2	Política de Pedrosa (2019)	17
2.3	Políticas de Silva Filho (2021).....	17
2.3.1	Política da minimização da diferença dos níveis	17
2.3.2	Política da minimização das movimentações do carro tripper.....	18
3	METODOLOGIA.....	21
4	PROPOSIÇÃO DE NOVAS POLÍTICAS	22
4.1	Política de minimização do nível máximo, a cada período.....	22
4.2	Política de minimização do nível máximo, em todos os períodos.....	23
4.3	Política de minimização do maior nível e de maximização do menor nível. .	23
4.4	Política de minimização do maior nível e maximização do menor nível considerando todos os períodos com minimização dos movimentos do tripper.....	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41

1 INTRODUÇÃO

O beneficiamento de minério possui uma série de operações que aumentam a concentração do minério, aumentando seu teor do mineral de interesse e reduzindo as concentrações de elementos contaminantes, para ser utilizado pela indústria. Durante as etapas deste processo, que podem ser observadas na Figura 1, se faz necessário a estocagem do minério, e para realizá-la, como mencionado por Caldas e Martins (2018), para uma planta de beneficiamento a seco podem ser utilizados tanques, pilhas ou silos, a depender da natureza do minério e da sua armazenabilidade.

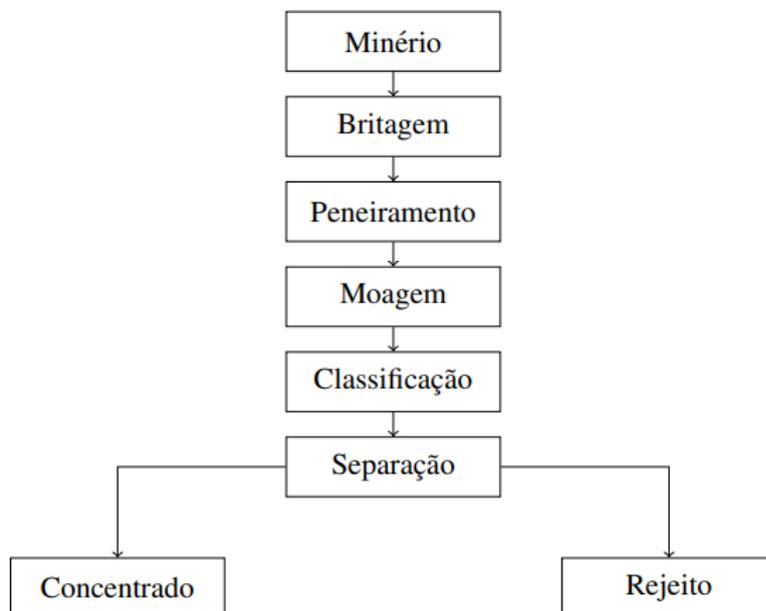


Figura 1 - Fluxograma simplificado do beneficiamento mineral. Fonte: Caldas e Martins (2018)

Os silos são estruturas em que o minério é armazenado, e seu carregamento e descarregamento ocorrem de maneira contínua. Como abordado em Pedrosa (2019), para que o carregamento aconteça são utilizadas correias transportadoras, que transportam o minério ao longo de todo o processo. Abaixo dos silos, existem os alimentadores que, dimensionados de acordo com o volume a ser processado, são responsáveis pela retirada do produto. Para realizar a distribuição do minério é utilizado um carro tripper, descrito por Caldas e Martins (2018), como um sistema mecânico desenhado para percorrer longitudinalmente ao longo do silo distribuindo minério.

A Figura 2 exemplifica um sistema silo-tripper, onde o carro tripper, representado pelo

retângulo pontilhado suportado por dois círculos, após ser alimentado pela correia transportadora, é responsável pela distribuição do minério entre os quatro compartimentos do silo. Em seguida, os quatro alimentadores, posicionados abaixo de cada uma das saídas do silo, recebem o minério e levam para as peneiras que, representadas por triângulos, fazem a divisão do material de acordo com sua granulometria.

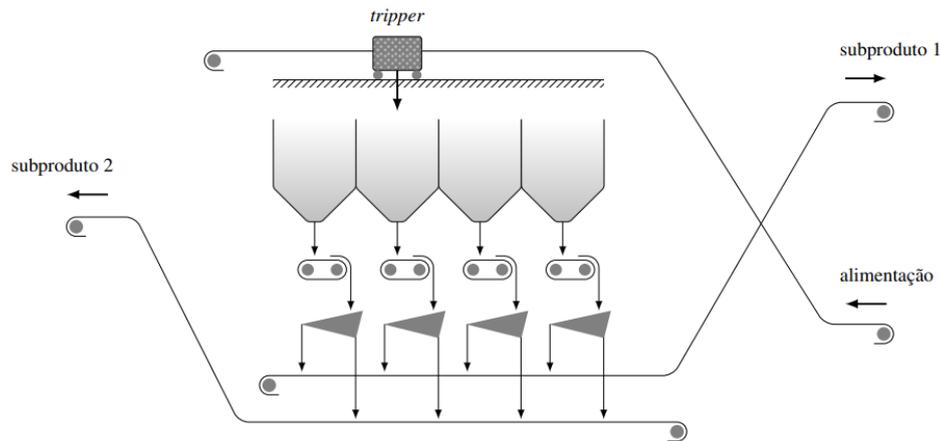


Figura 2 - Sistema silo-tripper. Fonte: Caldas e Martins (2018)

Sendo assim, o sistema silo-tripper funciona recebendo o produto que chega através da esteira e distribuindo entre os silos, os quais se movimentam ao longo da correia que alimenta o sistema. De acordo com Moraes (2019) o posicionamento do tripper é realizado por um operador humano, que se dedica a evitar que o silo fique vazio ou transborde, mas não apresenta critérios pré estabelecidos que sejam focados em algum outro desempenho. A movimentação do carro tripper depende mais da experiência do operador do que do acompanhamento de algum critério de desempenho, como o equilíbrio entre os níveis dos silos ou a economia de energia (SILVA FILHO, 2021).

Diante da importância da Pesquisa Operacional para o contexto, nos últimos anos surgiram novas propostas de modelos de otimização para automatizar o problema da movimentação do carro tripper, porém, ainda há espaço para outros questionamentos e proposições de políticas. O primeiro modelo proposto, em Caldas e Martins (2018), tem por objetivo maximizar o menor dos níveis a cada período do horizonte de planejamento. Logo após, Pedrosa (2019) formulou um modelo em que o objetivo passa a ser de maximizar o menor dos níveis de todos os períodos do horizonte de planejamento. Em ambos os trabalhos, o enfoque era na manutenção dos níveis dos silos, de forma que não houvesse esvaziamento completo destes.

Nesse contexto, não existem trabalhos que tratam do acúmulo de material ao longo do tempo, avaliando uma possível chance de transbordo dos silos. Outra questão é que, embora Silva Filho (2021) tenha proposto uma política focada na movimentação do carro tripper, visando minimizar os movimentos do tripper ao longo do tempo, essa estratégia não foi testada juntamente com as demais políticas existentes de maximização do nível mais baixo dos silos ou da minimização das diferenças entre níveis.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Tem-se como objetivo deste estudo estudar novas políticas de otimização da movimentação do carro tripper, partindo-se dos modelos propostos por Caldas e Martins (2018), Pedrosa (2019) e Silva Filho (2021).

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Propor novas políticas e testá-las, comparando os resultados com as formulações já existentes;
- ✓ Testar o comportamento dos modelos já existentes em relação às instâncias equilibradas de Pedrosa (2019);
- ✓ Descrever características práticas e de complexidade de resolução para cada modelo, utilizando o *software* de otimização AMPL/CPLEX.

1.2 Justificativa do trabalho

O problema de movimentação do carro tripper ainda é recente na literatura, tendo sido propostos apenas quatro modelos de otimização para a sua resolução. Em termos conceituais, a preocupação em evitar o esvaziamento dos silos foi mais estudada que a preocupação com o enchimento e transbordo desses mesmos silos. O nível máximo que um silo pode atingir não foi tratado em outro trabalho, além da política de minimização da diferença entre níveis, proposta por Silva Filho (2021). Outra questão importante é que as baterias de testes computacionais realizados com os modelos mostram que esses modelos são NP-difíceis e mesmo para um

conjunto pequeno de silos e para um curto horizonte de planejamento, os tempos necessários para obtenção e prova de otimalidade já se apresentam altos e, em alguns casos, ocorre o estouro de memória sem a completa resolução de algumas instâncias.

Para que o problema de otimização da movimentação do carro tripper seja melhor descrito na literatura e o seu comportamento computacional seja melhor compreendido, ainda é possível propor novas políticas e analisar novos critérios de desempenho para o sistema, mesmo sem a sua aplicação a um sistema real.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho se divide em 6 capítulos, sendo o primeiro a introdução, onde é feita a contextualização do problema, ratificando o objetivo deste trabalho que se desdobra em testar novas políticas para otimizar a movimentação do carro tripper. O segundo capítulo traz a revisão de literatura, relacionando este trabalho a estudos anteriores. O terceiro capítulo trata da metodologia usada. O quarto capítulo, aborda a explicação das 4 novas políticas propostas neste trabalho. O Capítulo 5 fala dos resultados computacionais. Para concluir, o Capítulo 6 trata das conclusões em relação ao que foi desenvolvido neste trabalho e das perspectivas para os trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Atualmente, a literatura que trata do problema de movimentação do carro tripper pode ser considerada em fase inicial e, por isso, o número de trabalhos que podem ser encontrados é bem reduzido. O primeiro trabalho publicado com o intuito de resolver o problema, foi o de Caldas e Martins (2018), através de um modelo de programação linear inteira mista, que tem por objetivo sequenciar a movimentação ótima do carro tripper, buscando, a cada etapa, maximizar o valor do nível mais baixo dentre os silos de armazenagem.

Em seguida, Pedrosa (2019) sugeriu uma modificação no modelo publicado por Caldas e Martins (2018), em que o objetivo se mantém, porém, ao invés de maximizar o menor nível a cada período de tempo, ele retorna o menor valor dos níveis em todos os intervalos de tempo. Ao final do trabalho, os resultados foram comparados. As métricas de comparação das políticas foram o tempo de processamento e o equilíbrio dos níveis dos silos ao longo dos horizontes de planejamento. Percebeu-se que a política de Caldas e Martins (2018) apresentava resultados satisfatórios em relação ao equilíbrio dos níveis dos silos se comparada a de Pedrosa (2019), porém, o tempo computacional segue uma ordem inversa, sendo a política de Pedrosa (2019) resolvida de forma mais rápida.

Silva Filho (2021) desenvolveu duas novas políticas, a primeira com o objetivo de minimizar a diferença entre os níveis em todos os intervalos de tempo. A segunda política, diferentemente das anteriores, não possui foco nos níveis dos silos e sim nos movimentos do carro tripper ao longo de cada período. Todos os estudos, visam de alguma forma alcançar um menor tempo de processamento e maior equilíbrio do processo. Ao término do estudo, todas as quatro políticas já publicadas foram comparadas.

2.1 Política de Caldas e Martins (2018)

Caldas e Martins (2018) foram os primeiros a propor que as variáveis do processo deveriam ser controladas e observadas. Para definir o modelo foram levados em consideração os dados de entrada, as variáveis de decisão, as restrições e a função objetivo.

Conjuntos:

- **T**, como conjunto de períodos de tempo;
- **P**, como conjunto de compartimento dos silos, esses dois definem o tamanho das

instâncias;

- **I**, como conjunto de níveis iniciais, que define o nível inicial de cada um dos compartimentos dos silos.

Parâmetros

- **n**, a quantidade de silos;
- **l_{max*i*}** e **l_{min*i*}**, os níveis máximo e mínimo que os silos podem atingir;
- **q**, a massa de entrada, ou seja, a massa que o tripper envia para o silo;
- **Q**, a massa de saída, ou seja, a massa que cada silo envia para as fases seguintes do processo;
- **K**, a taxa de esvaziamento do silo ao longo do tempo;
- **p**, a posição de partida do tripper.

Variáveis de decisão:

- **X**, variável binária, que tem como objetivo determinar o posicionamento do tripper ao longo dos períodos;
- **A** e **B**, são variáveis de folga para os níveis máximo e mínimo do silo, essas duas são responsáveis pela viabilidade do modelo, pois mesmo em situações extremas onde o silo possa estar completamente cheio ou vazio, elas garantem o resultado;
- **L** representa o nível de cada silo em cada intervalo de tempo;
- **Z**, que reflete o menor nível atingido em cada período, ela é uma variável auxiliar da função objetivo, que será explicada a seguir juntamente com as restrições.

De acordo com Caldas e Martins (2018), a função objetivo foi baseada no princípio MinMax (RICH; KNIGHT,1991) e tem como objetivo maximizar o valor do nível mais baixo dos compartimentos do silo a cada iteração.

$$\max \sum_{j \in T} Z_j - \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} - \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j}$$

S.a.:

$$Z_j \leq L_{i,j}, j \in T, i \in P \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=p} x_{i,j} = 1, \forall j \in T \quad (2.2)$$

$$X_{i,j} \leq X_{i-1,j-1} + X_{i,i-1} + X_{i+1,j-1}, \forall i \in [2, n - 1m], j \in [2, t] \quad (2.3)$$

$$X_{1,j} \leq X_{1,j-1} + X_{2,j-1}, \forall j \in [2, t] \quad (2.4)$$

$$X_{n,j} \leq X_{n,j-1} + X_{n-1,j-1}, \forall j \in [2, t] \quad (2.5)$$

$$X_{p,1} = 1 \quad (2.6)$$

$$L_{i,1} = L_i, \forall i \in T \quad (2.7)$$

$$A_{i,j} = \Delta A_{i,j} + A_{i-1,j}, \forall i \in P, j \in T \quad (2.8)$$

$$\Delta A_{i,1} = 0, \forall i \in P \quad (2.9)$$

$$B_{i,j} = \Delta B_{i,j} + B_{i-1,j}, \forall i \in P, j \in T \quad (2.10)$$

$$\Delta B_{i,1} = 0, \forall i \in P \quad (2.11)$$

$$L_{i,j+1} = L_{i,j} + K_i(q \cdot X_{i,j} - Q_i) + \Delta A_{i,j+1} - \Delta B_{i,j+1}, \forall i \in P, j \in [1, t - 1] \quad (2.12)$$

$$l_{min} \leq L_{i,j} \leq l_{max}, \forall i \in P, j \in T \quad (2.13)$$

A respeito das restrições do modelo, a (2.1) garante que a auxiliar Z receba o valor do menor nível L dos silos a cada período. As restrições (2.2) certificam que o tripper possa ocupar apenas uma posição X para cada período T . As restrições (2.3), (2.4) e (2.5) ratificam os possíveis movimentos do tripper, sendo a primeira para quando o carro tripper se encontrar nas posições intermediárias e as duas seguintes para quando o carro tripper estiver na primeira ou última posição, respectivamente. A restrição (2.6) define a posição inicial do tripper. As restrições são referentes aos níveis dos silos são as (2.7) e (2.13) sendo que a primeira define os níveis iniciais dos silos e a segunda restringe o nível de cada silo entre o limite máximo e mínimo. As restrições retratadas de (2.8) a (2.11) definem as variáveis de folga A e B . Essas variáveis controlam a viabilidade do problema, em relação ao esvaziamento e ao transbordo dos silos em condições extremas. Caso apresentem valores positivos em uma solução, significa que não é possível manter os silos sempre abastecidos na instância analisada. Essa consideração é diferente das considerações de maximização do nível mínimo na função objetivo. Já a restrição (2.12) garante o acúmulo de material.

Segundo Caldas e Martins (2018), para os testes deste estudo, foram utilizados dois métodos, um com algoritmos exatos e outro utilizando meta-heurísticas. Para a metodologia exata, os testes computacionais foram realizados com foco em avaliar as estratégias de movimentação do tripper e comparar a performance dos resolvedores CPLEX e GLPK. Já utilizando as meta-heurísticas, foram realizados com o objetivo de avaliar a performance da GRASP e Simulated Annealing, e observar o tempo que se gasta e a qualidade das soluções. Para realizar os testes, as instâncias criadas tiveram a quantidade de silos variando entre 3, 4, 5, 6, 7, 11, 16 e 24 e quantidade de períodos variando de 10 em 10 até chegar a 400 unidades de tempo.

O tempo de execução para os métodos exatos foi limitado em até 1000 segundos.

2.2 Política de Pedrosa (2019)

A política de Pedrosa (2019) tem apenas uma modificação em relação ao modelo de Caldas e Martins (2018), a variável Z , esta que antes era um vetor, agora passa a ser uma variável escalar, que armazena o menor valor de nível de todos os compartimentos dos silos ao longo de todo tempo, e não mais a cada período.

Para isso, o modelo continua sendo representado pelas restrições (2.2) à (2.13), substituindo a restrição (2.1) pela (2.15) que garante que a variável Z receba o valor do nível do silo mais vazio durante todos os períodos e modificando a função objetivo pela equação (2.14) que tem como premissa maximizar o menor nível dos silos a todo momento.

$$\max Z - \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} - \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j} \quad (2.14)$$

S.a.:

$$Z \leq L_{i,j}, j \in T, i \in P \quad (2.15)$$

A respeito dos testes, segundo Pedrosa (2019), para implementar o modelo foi utilizado o *software* Lingo 10.0, que teve interação com o *software* MS Excel 2010 para consulta dos dados e exposição dos resultados. Foram utilizadas 60 instâncias, equilibradas e desequilibradas, em a quantidade de silos variava entre 4, 6, 9 e 16, os intervalos de tempo variavam entre 20, 40 e 60 unidades de tempo. As instâncias foram implementadas nos dois modelos, de Pedrosa (2019) e de Caldas e Martins (2018), como resultado foram apresentadas 240 soluções, sendo 120 de cada modelo.

A autora conclui que, comparando com o modelo de Caldas e Martins (2018), o tempo de processamento do seu modelo foi melhor, porém o comportamento do processo tende a se estabilizar de uma forma melhor no modelo original, evitando um possível transbordo ou falta de minério, que acarretaria na paralisação do sistema.

2.3 Políticas de Silva Filho (2021)

2.3.1 Política da minimização da diferença dos níveis

O objetivo desta política, conforme Silva Filho (2021), é minimizar a diferença entre os níveis mais altos e mais baixos dos silos para cada período, ou seja, procura nivelar a quantidade armazenada em cada silo. Se para a política de Pedrosa (2019), quando comparado com a de Caldas e Martins (2018), tivemos uma mudança na variável Z , para esta política temos a substituição dela por outras três: Z_{min_j} , que recebe o valor do menor nível entre os silos a cada período; Z_{max_j} , que recebe o valor do maior nível entre os silos a cada período; e $diff_j$, que recebe a diferença entre o maior e menor valor entre os silos a cada período.

Para isso, o modelo continua sendo representado pelas restrições (2.2) a (2.13), adicionando a ele as restrições (2.17) a (2.20), em que as duas primeiras definem, respectivamente, os níveis mais baixos e mais altos durante cada período. A restrição (2.19) trata da diferença entre o maior e menor valor do nível de cada silo. Por fim, a restrição (3.20) apresenta os domínios das novas variáveis. A função objetivo é substituída pela equação (2.16).

$$\min \sum_{j \in T} Diff_j - \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} - \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j} \quad (2.16)$$

S.a.:

$$Z_{min_j} \leq L_{i,j}, j \in T, i \in P \quad (2.17)$$

$$Z_{max_j} \leq L_{i,j}, j \in T, i \in P \quad (2.18)$$

$$diff_j = Z_{max_j} - Z_{min_j}, j \in T \quad (2.19)$$

$$Z_{min_j}, Z_{max_j}, diff_j \in R_+, j \in T \quad (2.20)$$

2.3.2 Política da minimização das movimentações do carro tripper

Esta política tem como objetivo minimizar a movimentação do carro tripper, ou seja, ao contrário de outras políticas, que visam as variações dos níveis dos silos, esta foca nos movimentos do tripper ao longo do planejamento, o que gera uma economia de energia. (SILVA FILHO, 2021)

Para isso, assim como na política anterior, onde a variável Z do modelo de Caldas e Martins (2018) foi modificada, na função objetivo (2.21) desta política a variável Z dá o seu lugar para a variável Y , que tem como função receber a quantidade de movimentos que o carro tripper faz ao longo de todo tempo.

$$\min \sum_{j \in T} Y_j - \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} - \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j} \quad (2.21)$$

S.a.:

$$Y_j \geq X_{i,j} - X_{i,j+1}, j \in T, i \in P; j \geq 2 \quad (2.22)$$

$$Y_j \in \{0,1\}, j \in T \quad (2.23)$$

O modelo continua sendo representado pelas restrições (2.2) a (2.13), acrescentando ao modelo as restrições (2.22) e (2.23), em que a primeira tem a função de armazenar a quantidade de movimentos do tripper na variável e a última trata do domínio da nova variável.

Ainda sobre o estudo de Silva Filho (2021), para os testes o autor utilizou as instâncias do trabalho de Pedrosa (2019), totalizando 60 instâncias, equilibradas e desequilibradas, onde conforme já comentado, o número de silos alternou entre 4, 6, 9 e 16, a quantidade de períodos alternou entre 20, 40 e 60 unidades de tempo e para cada uma foram definidos 5 posições e níveis iniciais do tripper.

Os testes foram processados através da linguagem AMPL, com o solver CPLEX 11.1.1. Ao final, foram comparados os resultados dos modelos de Caldas e Martins (2018), Pedrosa(2019) e as duas políticas definidas por Silva Filho (2021), quanto ao tempo computacional e ao equilíbrio dos silos e dos seus níveis ao longo do tempo.

Como pode ser observado na Tabela 1, levando-se em consideração somente o tempo computacional de resolução do problema, a proposta de Pedrosa (2019) é a mais eficiente, pois conseguiu encontrar resultados para todas as instâncias e apresenta tempos menores que as demais propostas. Já considerando o equilíbrio dos silos e dos seus níveis ao longo do tempo, as propostas mais eficientes foram as de Caldas e Martins (2018) e a de minimização da diferença entre os níveis mais baixo e mais alto dos silos.

Outro estudo a respeito do problema de movimentação do carro tripper, foi o de Morais (2019), que tem como objetivo estudar uma nova abordagem, representando o problema de movimentação do carro tripper como um processo de decisão de Markov, que segundo (PELLEGRINI; WAINER, 2007 apud MORAIS, 2019) “é um método de formular problemas que obedecem a regra de que o efeito resultante de uma ação em um estado depende apenas dessa ação e do estado atual do sistema, além de serem são chamados de processos “de decisão”, porque modelam a possibilidade de um agente interferir sistematicamente no sistema executando

ações.”.

Instâncias de 16 silos - Tempos(s)				
Instância	Caldas	Pedrosa	Diferença	Movimentos
16_20_1	0,47	0,19	1,53	12,29
16_20_2	2,92	2,18	4,56	4,51
16_20_3	2,28	1,93	2,81	5,13
16_20_4	3,04	2,03	4,18	5,57
16_20_5	5,54	5,13	2,04	3,04
16_40_1	222,05	124,19	209,49	282,36
16_40_2	260,30	267,73	434,03	676,25
16_40_3	117,06	62,82	115,07	252,49
16_40_4	414,09	6,55	1186,20	266,70
16_40_5	195,72	100,26	276,76	796,70
16_60_1	-	6289,90	-	8179,51
16_60_2	-	233,86	-	-
16_60_3	-	41,42	-	-
16_60_4	40593,50	275,56	73983,30	-
16_60_5	46315,20	123,24	492995,00	-
Média	6250,38	502,47	38462,73	953,14

Tabela 1 - Tempos de execução para instâncias de 16 silos. Fonte: Silva Filho (2021)

Para a construção deste modelo, Moraes (2019) utilizou técnicas de programação dinâmica, buscando otimizar o problema por meio da análise de vários problemas mais simples. O modelo proposto, tem como objetivo maximizar o nível médio dos silos ao longo do tempo, e, com suas políticas, apresentou resultados aceitáveis quando avaliados os valores das folgas e o tempo de execução do algoritmo implementado.

Dentre todos os trabalhos que abordam o tema da otimização da movimentação do carro tripper, observa-se que nenhum deles considerou a ideia dos silos quase cheios, com possibilidade de transbordar. Os modelos que focaram no comportamento dos níveis dos silos, olharam para o equilíbrio, maximizando o menor nível dos silos ou minimizando a diferença entre o maior e o menor nível dos silos, esta constatação abre espaço para novas pesquisas com o intuito de enriquecer os dados e a literatura a respeito desse tema.

3 METODOLOGIA

A metodologia a ser abordada no presente trabalho será dividida quanto a sua natureza, seu objetivo, sua abordagem e seus procedimentos técnicos utilizados para realização da pesquisa. De acordo com a natureza, como este trabalho foca no estudo de novas possibilidades para a função objetivo, com o intuito de entender melhor o problema da movimentação do carro tripper, a pesquisa se caracteriza como axiomática, pois não tem o intuito de explorar nenhuma aplicação, estando limitada ao desenvolvimento de modelos matemáticos que são comparados apenas com outros modelos já existentes na literatura. Os critérios de desempenho analisados, o tempo necessário para obtenção da solução ótima é de cunho, além do esvaziamento e transbordo dos silos e a economia de energia não são critérios de desempenho controlados atualmente em aplicações reais que utilizam o carro tripper.

Segundo Miguel et al. (2011), este trabalho é classificado como modelagem quantitativa empírico-normativa, já que tem como objetivo o desenvolvimento de políticas que promovem a atual situação. Além disso, ela baseia-se em modelos que sugerem uma solução para o problema. Essa pesquisa tem uma abordagem quantitativa, pois na modelagem/simulação o autor modifica as variáveis e os seus níveis com o intuito de realizar testes de teoria e/ou verificar nas soluções como as variáveis são relacionadas. (MORABITO e PUREZA, 2012)

Por fim, o método utilizado será a modelagem e simulação, onde segundo (MORABITO e PUREZA, 2012), o modelo simula as operações da vida real ao longo do tempo, neste caso os movimentos do carro tripper. Sob a visão da pesquisa operacional, este problema deve ser resolvido seguindo as seguintes etapas: **Definição do problema**, onde é definido o escopo, as decisões de interesses e objetivos envolvidos, e o modelo conceitual. Neste caso, o problema foi definido por Caldas e Martins (2018); **Construção do modelo**, onde com as informações coletadas na primeira fase deve ser construído um modelo matemático a partir do modelo conceitual. Aqui são coletados os dados para definição dos parâmetros do modelo; **Solução do modelo**, onde os métodos de solução são utilizados. Neste trabalho, para modelar será operado o *software* CPLEX 11.1.1, com o intuito de buscar a solução ótima do modelo, atribuindo os melhores valores para cada variável do problema; **Validação do modelo**, nesta etapa é averiguado se o modelo apresentado representa adequadamente o problema em questão, ou seja, a qualidade da solução do problema depende de quão exato este modelo representa a realidade. Essa validação será apenas teórica ou axiomática, se limitando aos critérios de desempenho já mencionados.

4 PROPOSIÇÃO DE NOVAS POLÍTICAS

Caldas e Martins (2018) criaram o primeiro modelo em que o objetivo é não deixar esvaziar nenhum silo, ou seja, fazer com que não acabe minério em nenhum dos compartimentos mantendo o sistema em equilíbrio. Pedrosa (2019), propôs apenas uma alteração, em que esse objetivo passa a ser verificado durante todos os períodos de tempo. Em seguida, Silva Filho (2021) apresenta duas novas políticas, em que a primeira, que também observa o comportamento dos níveis dos silos, busca minimizar a diferença entre os níveis mais alto e mais baixo dos silos. A segunda, já visa acompanhar a movimentação do carro tripper, ou seja, tem como objetivo diminuir as movimentações gerando uma economia energia.

Nenhuma das políticas conhecidas na literatura levaram em consideração a possibilidade dos silos transbordarem. Este será um critério levado em consideração nas políticas apresentadas neste trabalho. Outro ponto, é que todos os outros modelos são focados em um único critério, menos o primeiro de Silva Filho (2021), que olha para o nível mais alto e para o mais baixo na medida de diferença entre níveis, porém, esta política apresentou uma complexidade computacional alta. Diante disso, 4 novas políticas são sugeridas neste trabalho, em que a ideia de testá-las é encontrar um modelo de menor complexidade computacional e com o maior número de critérios controlados ao mesmo tempo: esvaziamento, transbordo e economia de energia.

4.1 Política de minimização do nível máximo, a cada período

Esta política, assim como em Caldas e Martins (2018), controla o comportamento dos níveis dos silos a cada período. Enquanto a de Caldas e Martins (2018) busca maximizar o somatório dos níveis mínimos, evitando o esvaziamento dos silos, esta tem como objetivo minimizar o somatório dos níveis máximos, impedindo que os silos transbordem. Desta forma, a primeira alteração no modelo de Caldas e Martins (2018) é a troca da variável Z_j pela variável ZZ_j , que armazena o nível máximo a cada intervalo de tempo.

Sendo assim, o modelo segue representado pelas restrições (2.2) à (2.13), alterando a restrição (2.1) pela (2.25) que atesta que a variável ZZ receba o valor do nível mais alto a cada período de tempo, modificando a função objetivo pela equação (2.24) que tem como foco minimizar a soma do valor dos níveis mais altos evitando que os silos transbordem, e por fim a adição da equação (2.6) que trata do domínio da nova variável.

$$\min \sum_{j \in T} ZZ_j + \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} + \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j} \quad (2.24)$$

S.a.:

$$ZZ_j \geq L_{i,j}, i \in P, j \in T \quad (2.25)$$

$$ZZ_j \geq 0, j \in T \quad (2.26)$$

4.2 Política de minimização do nível máximo, em todos os períodos

Da mesma forma que em Pedrosa (2019), esta política leva em consideração as variações dos níveis dos silos em todo horizonte de planejamento e não a cada período como na política anterior, a Reis1, e em Caldas e Martins (2018). Sendo assim, o objetivo desta política é minimizar o maior nível entre os silos durante todos os períodos, focando em evitar o transbordo dos silos.

Para isso, algumas alterações no modelo de Pedrosa (2019) foram necessárias, primeiramente a variável Z foi substituída pela variável ZZ , que recebe o nível máximo durante todos os períodos de tempo. Portanto, a restrição (2.1) dá seu lugar para a restrição (2.28) que garante que a variável ZZ armazenará o valor do nível mais alto durante todo o planejamento, as restrições (2.2) à (2.13) continuam no modelo. Também é adicionada a restrição (2.29), que trata do domínio da nova variável. A última alteração é na função objetivo que passa a ser representada pela equação (2.27), com objetivo de minimizar o valor do nível mais alto dos silos, evitando assim o transbordo, a todo tempo.

$$\min ZZ + \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} + \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j} \quad (2.27)$$

S.a.:

$$ZZ \geq L_{i,j}, i \in P, j \in T \quad (2.28)$$

$$ZZ \geq 0, j \in T \quad (2.29)$$

4.3 Política de minimização do maior nível e de maximização do menor nível

Esta política, diferente das duas anteriores, tem dois objetivos simultâneos, é uma

junção do modelo de Pedrosa (2019), onde o objetivo é maximizar o menor nível em todos os períodos, com a política anterior, a Reis2, que tem como objetivo minimizar o maior nível em todos os períodos. Desta forma, esta política busca ao mesmo tempo, aumentar o valor do nível mais baixo e diminuir o valor do nível mais alto.

Para isso, algumas alterações no modelo de Pedrosa (2019) são necessárias, primeiramente a variável Z , que estava sendo substituída nos outros modelos, se mantém, armazenando o valor do menor nível em todos os períodos, temos também a inclusão da variável ZZ , que receberá o valor do maior nível durante todo o tempo. Sendo assim, as restrições (2.1) à (2.13) continuam representando este modelo e são adicionadas as restrições (2.28) e (2.29), em que a primeira garante que a variável ZZ receba o valor do nível mais alto, e a última trata do domínio desta nova variável. A última alteração é na função objetivo que passa a ser representada pela equação (2.30), com objetivo duplo de, ao mesmo tempo, maximizar o menor nível e minimizar o maior nível dos silos a todo momento.

$$\max \quad Z - ZZ + \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} + \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j} \quad (2.30)$$

4.4 Política de minimização do maior nível e maximização do menor nível considerando todos os períodos com minimização dos movimentos do tripper

Esta política, diferente de todas as anteriores, busca controlar 3 critérios ao mesmo tempo: esvaziamento, transbordo e economia de energia. Para isso, ela faz a junção da política anterior, a Reis3, em que o objetivo é ao mesmo tempo, maximizar o nível mais baixo e minimizar o nível mais alto dos silos a todo momento, evitando assim um possível esvaziamento e/ou transbordo, com a segunda política de Silva Filho (2021), que busca controlar a movimentação do carro tripper, com o objetivo de minimizar essas movimentações, gerando uma economia energia.

Com esse objetivo, são necessárias algumas mudanças no modelo de Silva Filho (2021), que visa diminuir as movimentações do carro tripper. Primeiramente é preciso voltar com a variável Z , que é responsável por armazenar o valor do menor nível ao longo de todo planejamento, depois adicionar a variável ZZ , que receberá o valor do maior nível a todo instante, e manter a variável Y , que tem como função receber a quantidade de movimentos que carro

tripper faz a todo momento.

Diante disso, além das restrições (2.2) à (2.13) que seguem valendo para esse modelo, mantêm-se também as restrições (2.22) e (2.23), em que a primeira tem a função de armazenar a quantidade de movimentos do tripper na variável Y e a outra trata do domínio desta variável. As restrições (2.15), (2.16), (2.28) e (2.29) também são necessárias, pois a primeira garante que a variável Z receba o menor valor dos níveis dos silos a todo momento, a segunda trata do domínio da variável Z , a terceira assegura que a variável ZZ receba o maior valor dos níveis dos silos a todo momento e a última trata do domínio da variável ZZ . Por fim, a última alteração é na função objetivo que passa a ser representada pela equação (2.31), que tem como objetivo a minimização do nível máximo e maximização do nível mínimo considerando todos os períodos com minimização dos movimentos do tripper.

$$\min \quad Z - ZZ + \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} + \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j} + \sum_{i \in P, j \in T} Y_{i,j} \quad (2.31)$$

Vale ressaltar que, assim como as políticas propostas por Caldas e Martins (2018), Pedrosa (2019) e Silva Filho (2021), as políticas aqui propostas pertencem à classe de problemas NP-difíceis, por terem sido formuladas com base nos modelos de sequenciamento em uma única máquina. Contudo, as formulações aqui propostas contribuem para essa classe de problemas, avaliando e combinando novos objetivos, de forma separada e simultânea.

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os testes foram realizados em um computador Dell XPS, com processador Intel Core i7-8700, velocidade de 3.20 GHz \times 12, 16 GB de memória RAM e sistema operacional Microsoft Windows 10. Os modelos foram implementados em AMPL e resolvidos com o CPLEX 11.1. As instâncias utilizadas nos testes foram as propostas por Pedrosa (2019), considerando apenas o conjunto de instâncias equilibradas, que possuem as mesmas vazões de entrada e saída no sistema. O número de silos varia entre 4, 6 e 9 e no número de períodos varia entre 20, 40 e 60, sendo utilizadas 5 variações para a posição inicial do carro tripper, sendo cada instância nomeada por: “número de silos”_”número de períodos”_”número do exemplar”.

A Tabela 2 serve de auxílio para o entendimento das abreviações feitas nas tabelas dos resultados computacionais, em que se discutem os tempos de execução das políticas até a obtenção da solução ótima, o controle dos níveis dos silos e o controle do número de movimentos do carro tripper.

Tabela 2 - Tabela auxiliar com as abreviações de cada política

Políticas	Abreviações
Maximização do menor nível a cada período (CALDAS e MARTINS, 2018)	CM1
Maximização do menor nível em todos os períodos (PEDROSA, 2019)	P1
Minimização da diferença dos níveis (SILVA FILHO, 2021)	SF1
Minimização dos movimentos do carreo tripper (SILVA FILHO, 2021)	SF2
Minimização do nível máximo a cada período	Reis1
Minimização do nível máximo em todos os períodos	Reis2
Maximização do menor nível com minimização do maior nível	Reis3
Maximização do menor nível com minimização do maior nível e dos movimentos do carro tripper	Reis4

Fonte: o autor

5.1 Tempo de execução necessário à obtenção da solução ótima

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos, em termos do tempo necessário à obtenção da solução ótima (segundos), para as 15 instâncias com quatro silos e 8 políticas, totalizando 120 testes. Observa-se, que já para as instâncias com menor número de silos já ocorre o estouro de memória sem obtenção da solução ótima em alguns dos testes realizados, caracterizando grande complexidade e porte para os casos em que isso aconteceu, ou seja, para as políticas CM1, SF1

e Reis1. Observa-se também que a instância 4_60_2 se mostrou de difícil solução para essas políticas, enquanto apenas Reis1 não foi resolvida para a instância 4_40_1.

Como esperado, pelo fato dessas políticas serem NP-difíceis, os desvios padrões dos tempos de resolução foram altos quando comparados aos valores médios, como já mostrado no trabalho de Silva Filho (2021). Ao se observar as colunas referentes às políticas P1, Reis2 e Reis3, observa-se uma certa tendência de linearidade, confirmando novamente as observações de Pedrosa (2019) e Silva Filho (2021), de que a política P1 possui menor complexidade computacional que as até então formuladas. As políticas Reis2 e Reis3, já com esses testes preliminares, parecem seguir a mesma tendência. A política Reis4 parece seguir a mesma tendência de SF2, sugerindo que a complexidade de SF2 se mantém na política Reis4.

Tabela 3 - Tempos de execução das instâncias com 4 silos

Instâncias	CM1	P1	SF1	SF2	Reis1	Reis2	Reis3	Reis4
4_20_1	0,08	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,08
4_20_2	1,12	0,03	2,74	0,62	0,96	0,09	0,05	1,89
4_20_3	0,05	-	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
4_20_4	0,02	0,02	0,01	0,02	-	0,02	-	-
4_20_5	0,06	0,02	0,08	0,42	0,02	-	-	0,11
4_40_1	1,36	0,02	9,13	0,25	*	0,03	0,06	0,37
4_40_2	2,34	0,03	6,73	0,48	46,99	0,02	-	0,34
4_40_3	25,06	0,83	36,36	1,42	17,84	0,72	10,09	141,45
4_40_4	11,90	-	39,13	0,11	29,07	0,03	0,03	2,09
4_40_5	12,29	0,45	6,94	2,94	63,27	0,02	0,20	5,05
4_60_1	126,45	0,03	21,79	69,03	57,19	0,06	0,13	88,18
4_60_2	*	0,02	*	5,45	*	0,05	0,03	42,69
4_60_3	36,12	0,02	48,71	8,25	71,42	0,03	0,05	12,18
4_60_4	10,78	0,06	5,72	15,47	3,05	0,05	0,05	6,40
4_60_5	221,29	0,39	9,75	137,06	3,01	0,16	0,25	106,19
Média	32,07	0,13	13,37	16,10	22,53	0,09	0,73	27,14
Desvio padrão	63,80	0,24	16,43	37,80	27,64	0,18	2,59	46,34

* Houve estouro de memória antes de encontrar a solução ótima

Fonte: o autor

A Tabela 4 mostra os tempos necessários à obtenção da solução ótima (segundos) para as 15 instâncias de 6 silos para as 8 políticas, totalizando 120 testes. Observa-se um aumento considerável nas médias dos tempos de processamento, em especial para instâncias com maior número de períodos de planejamento, indicando a necessidade de se investigar o efeito relativo do aumento do número de silos e de períodos nos tempos de processamento. Novamente, os desvios padrões foram altos, sendo que apenas na política Reis2 esse valor não superou a média. Os maiores desvios foram obtidos para as políticas SF1, Reis1, SF2 e CM1. No caso da política

de SF1, o desvio padrão foi mais que 3,5 vezes o valor da média dos tempos de execução, indicando que esse modelo aparenta ter a maior complexidade computacional, como já havia sido observado por Silva Filho (2021). Porém, é interessante destacar que Reis1 apresentou um desvio padrão 2,9 vezes maior que a média, contra apenas 1,75 para a política de CM1. Sendo esses dois modelos idênticos, mas com focos opostos na função objetivo, de impedir o transbordo e o esvaziamento dos silos, respectivamente, e um efeito computacional tão discrepante, torna-se importante realizar uma maior bateria de testes computacionais, pois, estatisticamente, os tempos de processamento e os desvios padrões dessas duas políticas devem ser próximos.

Tabela 4 - Tempos de execução das instâncias com 6 silos

Instâncias	CM	P1	SF1	SF2	Reis1	Reis2	Reis3	Reis4
5_20_1	0,53	0,02	0,60	0,27	0,02	0,05	0,02	0,30
5_20_2	0,17	0,02	0,18	0,47	0,01	0,02	0,02	0,34
5_20_3	0,25	0,02	0,27	0,13	0,01	0,03	0,02	0,30
5_20_4	0,28	0,06	0,31	0,42	0,04	0,03	0,03	1,23
5_20_5	0,11	-	0,14	0,31	0,01	0,02	0,02	0,33
5_40_1	23,09	0,33	15,66	8.499,57	0,18	0,05	0,31	4.791,07
5_40_2	8,89	0,48	8,38	267,09	2,01	0,22	3,22	63,17
5_40_3	8,42	0,30	5,45	56,39	0,43	0,28	0,36	69,42
5_40_4	17,04	0,86	14,02	28,74	2,00	0,28	0,39	66,16
5_40_5	957,53	0,05	760,67	142,87	0,16	0,37	0,27	261,63
5_60_1	*	1,00	*	2.822,09	*	0,89	0,70	18.408,90
5_60_2	36.012,00	2,61	*	2.237,89	3.246,05	0,58	0,50	*
5_60_3	12.208,90	3,20	*	1.933,14	19.374,26	0,31	2,94	6.594,51
5_60_4	29.517,50	2,02	*	*	*	0,55	1,45	*
5_60_5	22.272,20	0,53	*	46.171,30	*	0,23	0,23	19.096,00
Média	7.216,21	0,77	57,55	4.440,05	1.885,43	0,26	0,70	3.796,41
Desvio padrão	12.664,74	1,03	239,04	12.231,23	5.586,03	0,26	1,04	6.968,40

* Houve estouro de memória antes de encontrar a solução ótima

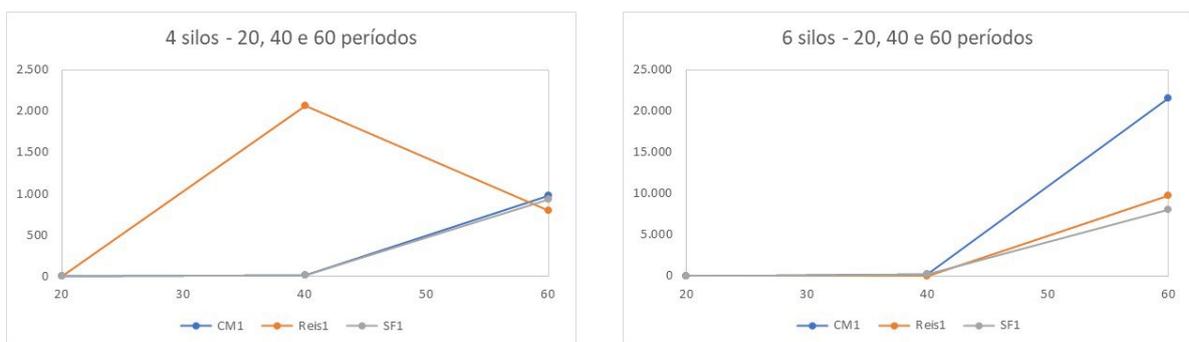
Fonte: o autor

Nessa bateria de testes, em 12 instâncias ocorreu o estouro de memória antes da obtenção da solução ótima, o que indica um aumento de complexidade computacional em relação à bateria de testes realizados com instâncias de 4 silos. Esse estouro de memória, novamente teve maior número de ocorrências em testes realizados com 60 períodos de planejamento, o que indica que o número de períodos aumenta significativamente o porte dessas políticas, embora nada se possa afirmar em relação ao aumento da complexidade de resolução. Comparando as colunas SF2 e Reis4, novamente, é possível observar uma tendência comum nos tempos de processamento de ambas, da mesma forma que se observou para as instâncias de 4 silos.

Com o objetivo de fazer observações mais específicas em relação aos tempos de processamento dessas políticas, foram construídos os gráficos das figuras que se seguem, agora tentando comparar grupos de políticas alternativas. Na Figura 3, têm-se os tempos de processamento para as instâncias de CM1, SF1 e Reis1, que foram agrupadas por apresentarem a tendência de possuírem maiores tempos de processamento e uma evolução exponencial mais acentuada que as demais formulações. Além disso, essas formulações desconsideram a minimização dos movimentos do carro tripper, estando voltadas apenas ao controle dos níveis dos silos. A primeira observação a ser feita é que a mudança de 4 para 6 silos aumentou a escala dos tempos de processamento em 10 vezes, estando os maiores tempos de processamento na combinação entre o maior número de silos e o maior número de períodos de planejamento. Apenas um teste destoou dessa tendência, que é a política de Reis1 para a instância 4_40_1, em que houve o estouro de memória sem a obtenção da solução ótima.

Embora esses gráficos apresentem pouquíssimos pontos, sendo cada ponto construído da média de 5 observações, uma para cada variação da posição inicial do carro tripper, já é possível observar a tendência exponencial no caso de 6 silos. Para os testes com 4 silos, apenas a política de Reis1 não permitiu o mesmo tipo de visualização, com uma média muito elevada nos testes realizados para 40 períodos de planejamento.

Figura 3 – Comparações de tempo de processamento entre as políticas CM1, SF1 e Reis1



Fonte: o autor

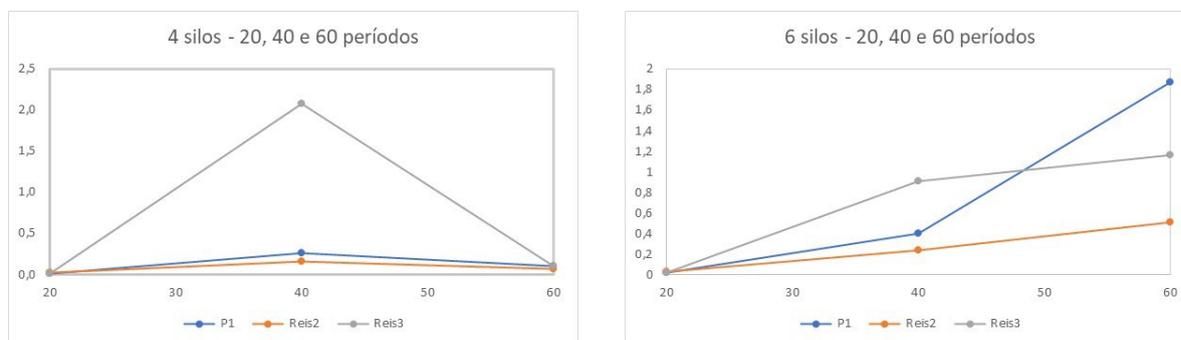
A Figura 4 mostra os tempos de processamento médios, obtidos para as 5 variações de posição inicial do carro tripper para as políticas P1, Reis2 e Reis3. Essas políticas mostraram resultados de uma menor complexidade computacional e um comportamento ainda linear para o tempo de processamento nos 240 testes já discutidos, embora esse resultado não possa ser generalizado. Essas políticas, em comum, consideram apenas o nível de interesse dos silos, menor, maior e menor e maior simultaneamente, em todo o horizonte de planejamento, não

buscando otimizar esses níveis a cada período, como as políticas CM1, SF1 e Reis1.

Em primeiro lugar, todos os testes foram realizados em uma mesma escala de tempo, de aproximadamente 2 segundos. Pelo fato dos tempos não serem significativamente maiores nas instâncias de 6 silos em relação às de 4 silos, sugere-se que o número de silos tem um menor impacto na complexidade do modelo do que o aumento do número de períodos de planejamento. No caso dos testes realizados com 6 silos, os tempos de processamento mostram uma maior aleatoriedade e uma média um pouco elevada, mas de mesma escala.

Novamente, houve um outlier evidente, que foi observado para a política R3, com 4 silos e 40 períodos. O teste que demorou mais tempo para ser realizado foi para a instância 4_40_3, que demorou 10,09 segundos para ser resolvida. O comportamento dos testes para instâncias de 6 silos mostrou uma leve tendência exponencial, mas novamente, em uma escala muito inferior à observada para as políticas CM1, SF1 e Reis1. Esses gráficos ainda mostram que as políticas P1, Reis2 e Reis3, apesar de Pedrosa (2019) apontar uma pequena piora do controle do nível dos silos para a política P1 em relação à CM1, são promissoras para aplicações práticas, pois as soluções ótimas podem ser obtidas em um tempo de processamento compatível com o processo de tomada de decisões da aplicação real dessas políticas.

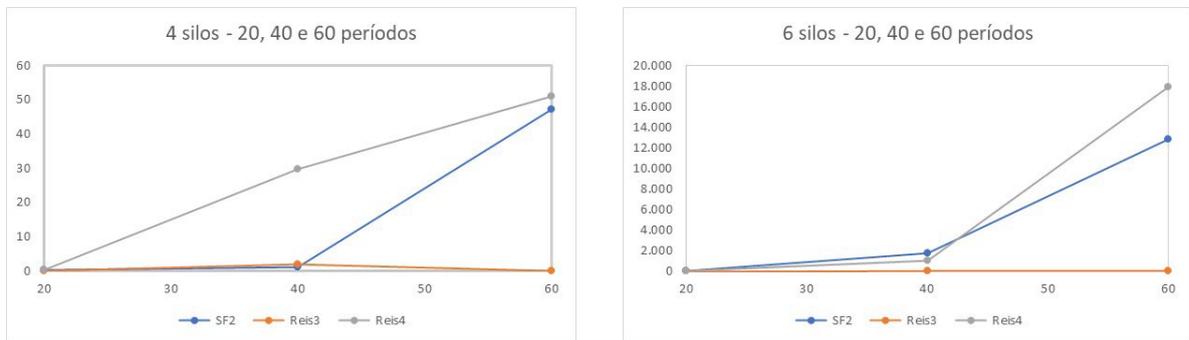
Figura 4 – Comparações de tempo de processamento entre as políticas P1, Reis2 e Reis3



Fonte: o autor

A Figura 5 mostra os resultados obtidos para as políticas de SF2, Reis3 e Reis4. As políticas de SF2 e Reis4 consideram a minimização dos movimentos do carro tripper, o que pode ser usado como uma medida de economia no sistema silo-tripper. A política Reis3 foi incluída pela necessidade de comparação de complexidade computacional relacionada à inclusão da minimização dos movimentos do carro tripper a uma política que controla apenas os níveis dos silos. Como Reis3 apresenta baixa complexidade computacional às outras duas políticas, já era esperado que seu gráfico apresentasse um formato mais achatado nessa comparação.

Figura 5 - Comparações de tempo de processamento entre as políticas SF2, Reis3 e Reis4



Fonte: o autor

Houve um aumento considerável na escala dos tempos de resolução dessas políticas, indicando uma forte dependência do número de silos e no número de períodos de planejamento na tendência relativa ao aumento de tempo de processamento com o aumento do porte das instâncias. Esse comportamento é bastante sugestivo de complexidade exponencial, sendo observado para os dois casos em que se tem a minimização dos movimentos do carro tripper, que são as políticas SF2 e Reis4. Reis3 se mostra bastante linear e com tempos de processamento bem próximos em todos os testes que compõem esses dois gráficos. O teste que provocou o outlier da política de Reis4 com 4 silos e 40 períodos também foi 4_40_3.

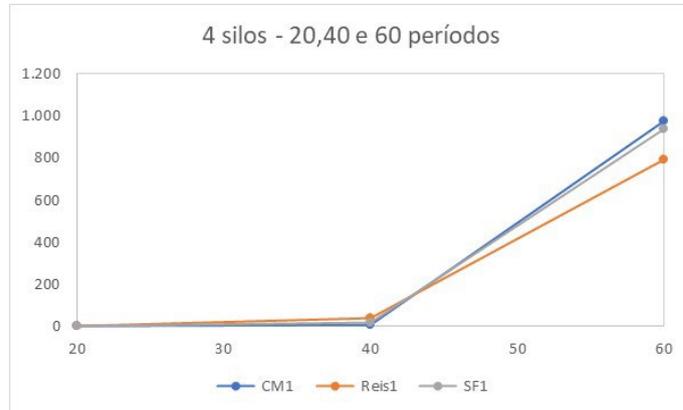
Na disponibilidade de poucos testes para fazer a análise de resultados e com alguns outliers bastante visíveis, novas análises foram conduzidas retirando-se esses outliers da amostra. A Figura 6 mostra o comportamento das políticas CM1, SF1 e Reis1 com a exclusão da instância 4_40_1. Nesse gráfico, a tendência exponencial dos tempos de resolução fica bem mais evidente, sendo possível perceber, também que a escala é muito próxima entre as políticas, não sendo possível destacar nenhuma como de maior ou menor complexidade computacional.

Conforme já comentado em Silva Filho (2021), as políticas de CM1 e SF1, para serem utilizadas em aplicações reais, não poderão ser solucionadas em tempo computacional aceitável e, além disso, muitas delas não podem ser resolvidas, pois ocorre o estouro de memória antes do término do processamento pelo CPLEX. Para essas políticas, e para Reis1, recomenda-se a construção de heurísticas ou metaheurísticas caso se deseje usá-las em aplicações reais.

A Figura 7 mostra o efeito da retirada da instância 4_40_3 das políticas P1, Reis2 e Reis3. Em (a), essa instância foi excluída apenas dos testes com a política Reis3 e em (b), a mesma instância foi excluída da análise das três políticas. Observa-se que, sem esse outlier, as três políticas apresentam tempos de processamento pequenos, com tendência linear e um certo grau

de aleatoriedade. Esses resultados indicam que essas políticas poderiam ser resolvidas de forma exata e utilizadas em aplicações práticas. Assim, seria interessante dar continuidade à pesquisa.

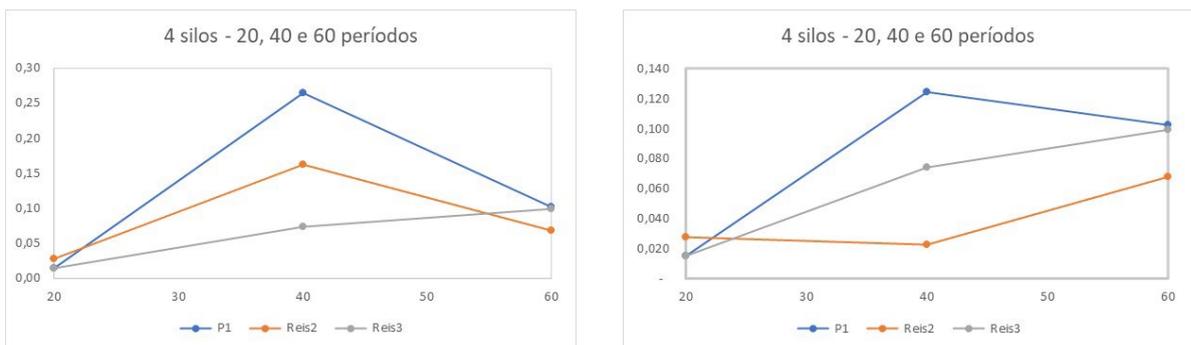
Figura 6 – Tendência das políticas CM1, SF1 e Reis1 sem a instância 4_40_1



Fonte: o autor

A Tabela 5 mostra os tempos de execução com as instâncias com 9 silos, considerando apenas as políticas propostas neste trabalho. Como já era de se esperar, as políticas Reis1 e Reis4 apresentaram tempos de execução muito maiores que as políticas Reis2 e Reis3. Todas as instâncias foram resolvidas, não havendo estouro de memória em nenhum dos testes.

Figura 7 - Tendência das políticas P1, Reis2 e Reis3 sem outliers



(a) Sem 4_40_3 em Reis3

(b) Sem 4_40_3 em todas as políticas

Fonte: o autor

A Figura 8 mostra o comportamento dos tempos de execução para as quatro políticas propostas neste trabalho. É possível perceber que os tempos de processamento aumentam consideravelmente com o aumento do número de silos e do número de períodos para as políticas Reis1 e Reis4. Já as políticas de Reis2 e Reis3 são rapidamente resolvidas para todas as instâncias

testadas. Os tempos de processamento da política de Reis3 parecem maiores que os de Reis2, ficando cerca de duas vezes maiores, contudo, esses tempos são muito menores quando comparados às políticas Reis1 e Reis4.

Em relação a Reis3 e Reis4, que atuam tanto na minimização do maior nível de todos os silos, quanto na maximização do menor nível de todos os silos, em relação a todo o horizonte de planejamento, percebe-se que, ao incluir a minimização dos movimentos do carro tripper, Reis4 apresenta uma complexidade computacional muito superior a Reis3.

Tabela 5 - Tempos de execução das instâncias com 9 silos

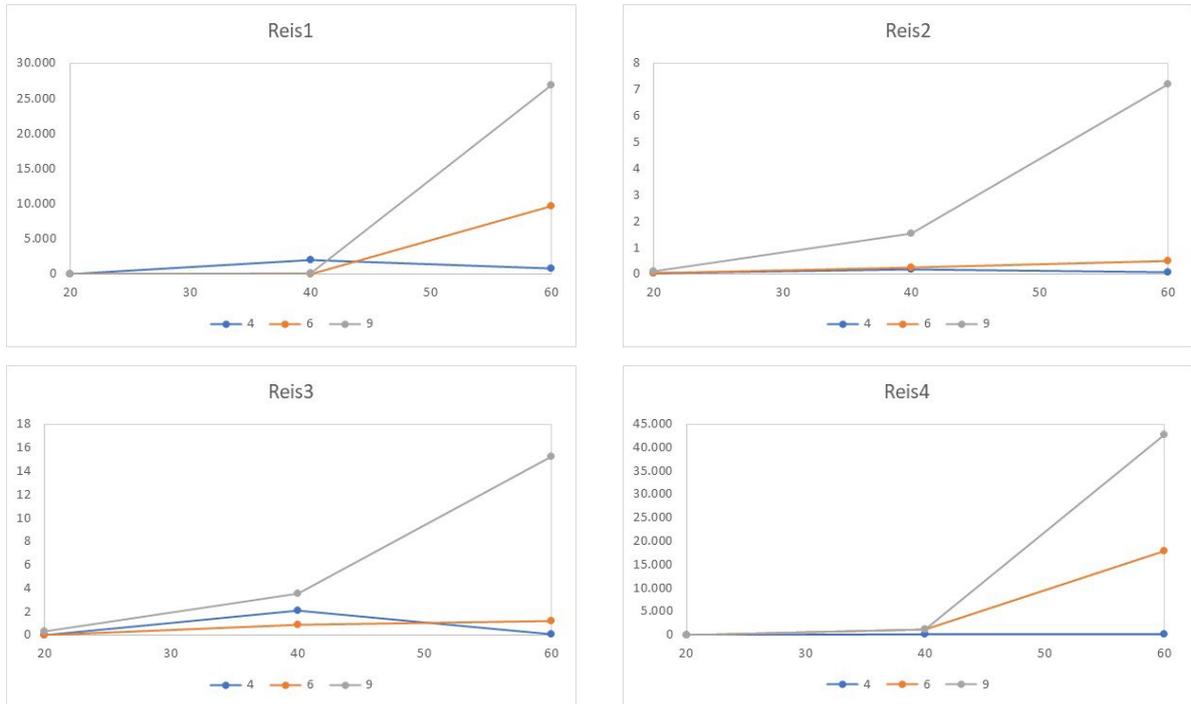
Instâncias	Reis1	Reis2	Reis3	Reis4
9_20_1	1,28	0,11	0,34	1,14
9_20_2	1,26	0,09	0,34	1,14
9_20_3	0,06	0,16	0,03	0,81
9_20_4	0,21	0,14	0,59	2,55
9_20_5	0,04	0,09	0,28	0,50
9_40_1	5,86	3,12	1,00	1.567,06
9_40_2	22,46	0,89	13,18	86,92
9_40_3	702,89	2,53	1,00	736,69
9_40_4	82,11	0,73	1,70	2.667,81
9_40_5	13,47	0,48	0,64	87,65
9_60_1	33.107,52	6,90	6,86	27.453,64
9_60_2	32.075,66	15,43	60,35	35.060,33
9_60_3	17.564,06	2,92	4,26	67.933,44
9_60_4	32.622,07	2,89	2,97	42.378,86
9_60_5	18.869,04	7,92	2,00	40.384,84
Média	9.004,53	2,96	6,37	14.557,56
Desvio padrão	13.726,85	4,24	15,33	22.129,61

Fonte: o autor

A Figura 9 mostra os tempos de execução apenas para os testes com 9 silos, que são as maiores instâncias que foram testadas para as políticas propostas neste trabalho. É possível perceber que Reis2 e Reis3 apresentam menor complexidade computacional que Reis1 e Reis4.

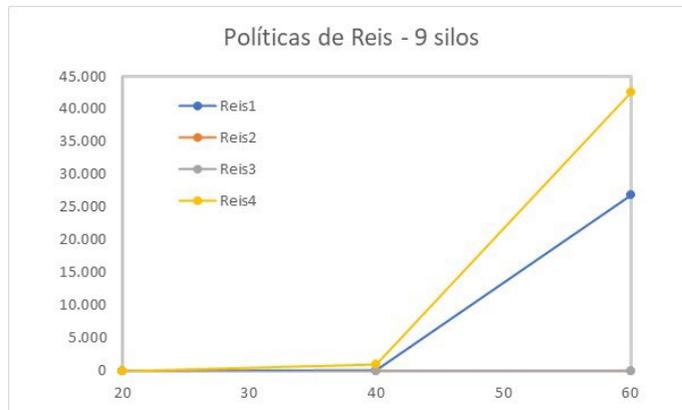
Embora a quantidade de testes realizados seja pequena e as estatísticas apresentadas não possam definir o comportamento computacional das políticas para o problema de otimização da movimentação do carro tripper, as observações aqui apresentadas são importantes. Elas servem para ilustrar e comprovar constatações de Silva Filho (2021), em que se observou que as políticas de CM1 e SF1 apresentam complexidade computacional que inviabiliza as suas aplicações em sistemas reais, dados o porte do sistema e o número de períodos que deve ser planejado. Também é possível corroborar com a ideia de que a política de Pedrosa (2019) pode ser resolvida de forma exata para um maior número de silos e períodos de planejamento.

Figura 8 – Comportamento dos tempos de processamento das políticas de Reis



Fonte: o autor

Figura 9 – Tempos de execução para 9 silos com 20, 40 e 60 períodos



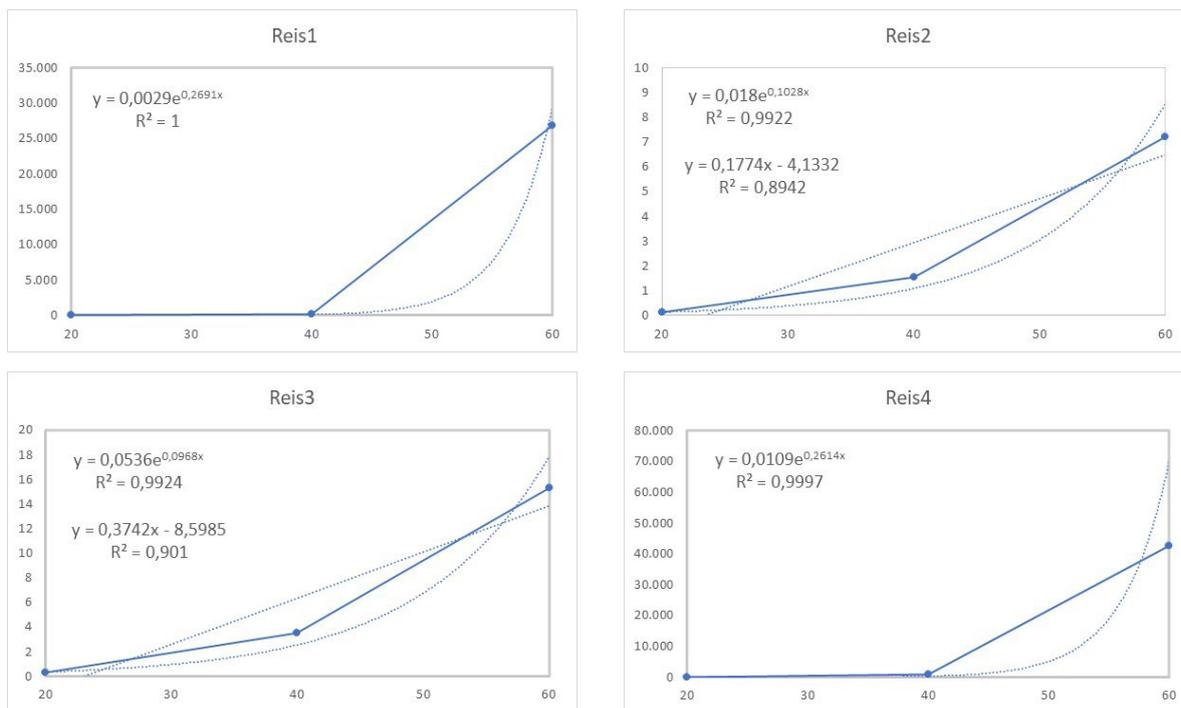
Fonte: o autor

Porém, como as políticas aqui propostas nunca tinham sido formuladas e comparadas às demais, os testes apresentados foram capazes de inserir essas novas políticas no escopo do que já havia sido publicado na literatura, tanto em termos de representação do problema, quanto em termos da complexidade computacional de cada uma delas. A Figura 10 faz o ajuste teórico, considerando curvas exponenciais, e lineares quando pertinente, para as políticas de Reis.

Em relação ao ajuste exponencial, por se tratarem de problemas NP-difíceis, esse se ajuste se faz pertinente para todas as políticas. Para as políticas de Reis1 e Reis4, que já apresentam

altos tempos de execução mesmo considerando instâncias de pequeno porte, essa afirmativa parece fazer mais sentido. Porém, para as políticas Reis2 e Reis3, o limite computacional ainda não foi descrito, pois elas foram testadas apenas para instâncias de porte reduzido. Por causa disso, um ajuste linear também faz sentido, mas apenas para instâncias do mesmo porte em que essas políticas já foram testadas.

Figura 10 - Ajuste de curvas para a complexidade computacional das políticas de Reis



Fonte: o autor

Como as instâncias já testadas para Reis2 e Reis3 são resolvidas até 10 ou 20 segundos, respectivamente, é necessário aumentar sistematicamente o número de silos e de períodos de planejamento para se encontrar o limite prático de uso dessas políticas, resolvendo-as de forma exata, usando pacotes computacionais, como o AMPL/CPLEX, usado neste trabalho

5.2 Equilíbrio dos níveis dos silos

Para esta análise comparativa, o entendimento dos gráficos expostos nesta seção é de extrema importância, pois eles representam os valores ótimos da variável L nos resultados de cada um dos testes realizados, separados pela quantidade de silos e períodos. Como a variável L armazena o valor do nível do silo ao longo do tempo, os gráficos nos mostram o comportamento do volume dos níveis ao longo do tempo. As instâncias escolhidas para a análise foram a 4_60_1, de 4 silos e 60 períodos, e a 6_40_1, de 6 silos 40 períodos.

Na Figura 11, são mostrados os resultados dos testes da instância 4_60_1, e é possível verificar que as políticas de CM1, SF1 e Reis1, proposta neste trabalho, apresentaram os melhores controles no equilíbrio dos níveis ao longo do período. Entre elas, a SF1 e a Reis1 terminam com os mesmo níveis em cada silo, em um equilíbrio quase perfeito. Porém, Reis1 não foi tão constante ao longo do tempo, pois silo 4, que iniciou o planejamento no nível mais baixo, foi sendo drenado até chegar a 5 níveis do esvaziamento total, no período 23.

Comparando a política Reis3, que busca controlar o esvaziamento e o transbordo, com suas inspiradoras, a política P1, que busca maximizar o nível mais baixo, e a política Reis2, que visa minimizar o nível mais alto, podemos perceber que a Reis3 se sai melhor no controle do equilíbrio do volume dos silos ao longo do tempo. No período 58, o silo 1 de P1 quase transbordou, atingindo 98% da sua capacidade, e no período 31, o silo 4 de Reis2 quase esvaziou por completo, sobrando apenas 1% da sua volumetria.

Ainda na Figura 11, entre as políticas que consideram a movimentação do tripper como critério a ser reduzido ao longo do tempo, a Reis4, que também busca a minimização e a maximização dos níveis máximos e mínimos respectivamente, apresenta melhor resultado, controlando melhor os níveis ao longo dos períodos, em comparação com a política SF2 que, inclusive, deixa um silo esvaziar no período 28.

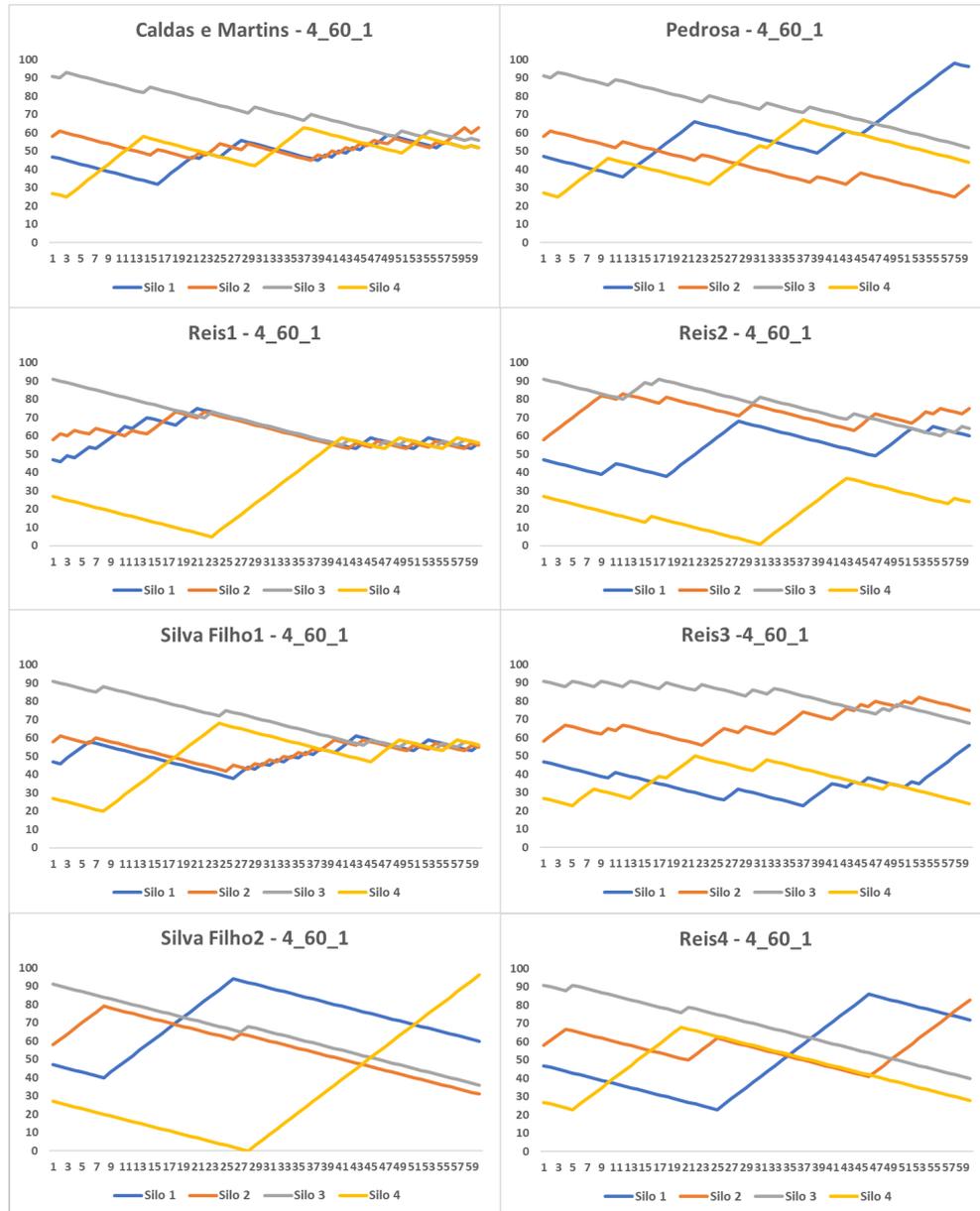
Assim como nos resultados dos testes da instância 4_60_1, nos testes ilustrados na Figura 12, as políticas de CM1 e a de SF1 também apresentaram os melhores resultados, tendo em vista o equilíbrio dos níveis durante o processo.

Desta vez, Reis1, que tem o objetivo de reduzir o nível do silo com maior volume a cada período de tempo, não conseguiu controlar tão bem os níveis mais baixos, deixando, durante os períodos 31 e 35, os silos 1 e 5, respectivamente, esvaziarem por completo, apesar desses mesmos silos serem reabastecidos a partir do período seguinte.

Ainda nos testes mostrados na Figura 12, percebemos que Reis3 continua tendo resultados melhores que P1 e Reis2, pois além da política Reis3 apresentar melhor controle do nível dos silos, terminando com menor variação entre os níveis, a política de P1 atingiu no último período o nível máximo do silo, ficando em iminência de transbordar, e a Reis2, deixou durante 4 períodos 3 silos diferentes esvaziarem por completo, colocando o processo em risco.

Ainda é possível confirmar nos resultados da Figura 12, que a política Reis4 realmente apresenta melhor resultado quando comparada com a segunda política SF2, pois apresenta menor variação entre os níveis ao longo do tempo e, além disso ela também busca reduzir as movimentações do tripper ao longo do tempo, gerando economia de energia para o processo.

Figura 11 - Volume dos níveis dos silos ao longo do tempo na instância 4_60_1



Fonte: o autor

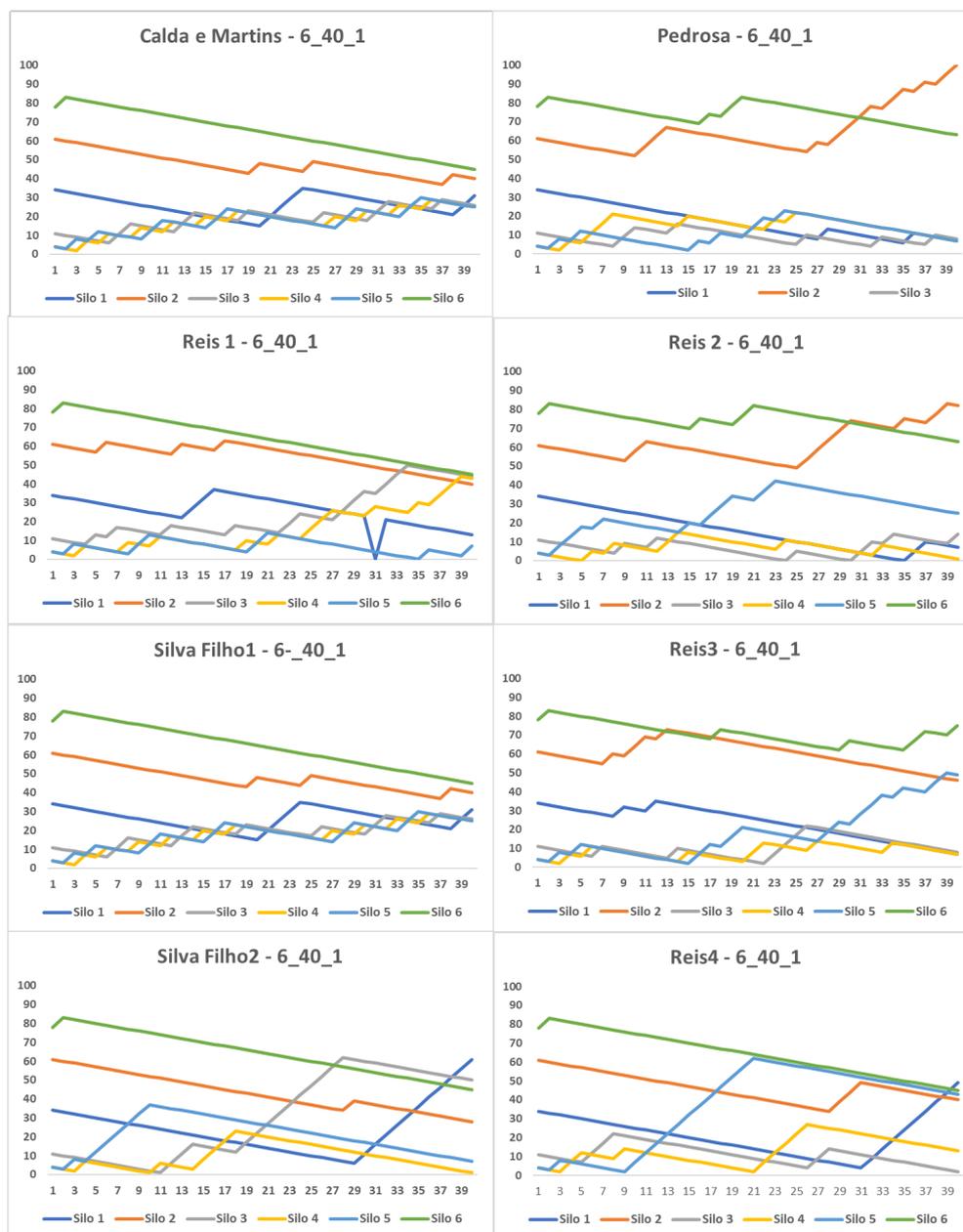
5.3 Número de movimentos do carro tripper

O número de movimentos do carro tripper pode ser uma métrica eficiente de comparação das políticas, uma vez que, dadas as dimensões e o esforço de movimentação deste nas correias transportadoras nos períodos de planejamento, políticas que realizam menos movimentos tendem a apresentar economia energética. As instâncias escolhidas para esta análise são as mesmas da seção anterior, sendo elas: 4_60_1, de 4 silos e 60 períodos, e 6_40_1, de 6 silos e 40 períodos.

Das oito políticas propostas, somente duas trabalham diretamente com os movimentos realizados pelo carro tripper: SF2, que tem por objetivo a minimização dos movimentos

realizados, e Reis4, que, além de maximizar o menor dos níveis e maximizar o maior dos níveis, também tem o objetivo de minimizar os movimentos do carro tripper. Diante disso, é notável a diferença de resultados quanto a essa métrica em relação as demais políticas. A Tabela 6 apresenta o quantitativo de movimentos realizados pelo carro tripper em cada uma das políticas.

Figura 12 - Volume dos níveis dos silos ao longo do tempo na instância 6_40_1



Fonte: o autor

Nas políticas onde há a consideração dos movimentos do carro tripper, os resultados das instâncias apresentadas mostram números de movimentos inferiores a 10% para a instância

4_60_1 durante o período de planejamento, e inferiores a 25% para a instância 6_40_1. As demais políticas apresentam tempos de movimentação do carro tripper entre 32% e 68%, mostrando uma diferença significativa em relação as políticas de SF2 e Reis4.

Tabela 6 – Movimentos realizados pelo tripper em cada política

	CM	P1	SF1	SF2	Reis1	Reis2	Reis3	Reis4
4_60_1	31	19	32	4	27	21	32	6
6_40_1	27	26	27	9	26	24	27	9

Fonte: o autor

Ao se comparar as políticas Reis3 e Reis4, em que Reis3 trata a maximização do menor nível e minimização do maior nível, e Reis4, que abrange o objetivo de Reis3 somando a minimização da movimentação do carro tripper, algumas particularidades podem ser constatadas. Para a instância 4_60_1, o tripper realizou movimentos em 53% do horizonte de planejamento na política de Reis3, ao passo que, em Reis4, a quantidade de movimentos se reduz para 10% do horizonte de planejamento. Já para a instância 6_40_1, em Reis3, o carro tripper se movimenta em 68% do horizonte de planejamento, ao passo que, em Reis4, os movimentos caem para 22,5% do horizonte de planejamento.

Para estas duas políticas, é possível, também, comparar o maior e o menor nível dos horizontes de planejamento. A Tabela 7 apresenta os níveis máximos e mínimos, e os tempos de execução destas políticas.

Tabela 7 – Níveis máximos e mínimos e tempos de execução das políticas Reis3 e Reis4

	Reis3			Reis4		
	Max	Min	Tempo (s)	Max	Min	Tempo (s)
4_60_1	91	23	0,125	91	23	88,182
6_40_1	83	2	3,217	83	2	63,172

Ao se analisar a tabela, é perceptível que ambas as políticas apresentam os mesmos níveis máximos e mínimos ao fim dos horizontes de planejamento, o que mostra que a política Reis4 conseguiu objetivo similar ao da política Reis3, porém com uma quantidade menor de movimentos, o que mostra que esta política se mostra eficiente para a métrica de economia de energia. Porém, seu tempo de processamento computacional é maior. Para a instância 4_60_1, a

política Reis3 dispendeu menos de 0,14% do tempo de Reis4 para resolver o problema. Já para a instância 6_40_1, o tempo gasto pela política Reis3 foi menos de 5,10% do tempo dispendido pela política de Reis4.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs novas abordagens para solucionar o problema da movimentação do carro tripper. O trabalho de Caldas e Martins (2018) foi o primeiro a propor resolver este problema, modelando o sistema silo-tripper como um problema de otimização combinatória. Posteriormente, Pedrosa (2019), Morais (2019) e Silva Filho (2021), sugeriram novas políticas com critérios e/ou objetivos diferentes, mas que os resultados pudessem ser comparados em dois quesitos: tempo de processamento e equilíbrio do processo.

Para criar as novas políticas deste trabalho um novo critério foi considerado: não havia estudo sobre o comportamento dos modelos quando o sistema acumula material ao longo do tempo e se busca evitar o transbordo dos silos, como critério principal da função objetivo, ou seja, não tinha sido considerada a possibilidade dos silos transbordarem, além da viabilidade relaxada, já presente na formulação de Caldas e Martins (2018). Sendo assim, os modelos foram testados controlando o maior número de critérios ao mesmo tempo: o esvaziamento, o transbordo e a economia de energia.

A primeira impressão ao analisar os resultados dos 300 testes realizados, é que as instâncias podem influenciar muito o tempo de processamento da política de Caldas e Martins (2018) quando os silos apresentam uma tendência a esvaziar e o objetivo previamente estabelecido for como o de Reis1, minimizar o nível máximo. Pedrosa (2019) se mostrou mais uma vez mais rápida na resolução que Caldas e Martins (2019). Reis2, com a política de minimizar o maior nível em todo período de tempo, apresentou ser o modelo com maior rapidez na resolução do problema.

A política Reis4, que envolve o controle de três critérios, o esvaziamento, o transbordo e a minimização dos movimentos do tripper, apresenta bons tempos de processamento para pequenas quantidade de silos, quando aumenta-se o número de silos o tempo de processamento não é satisfatório. As únicas políticas que não tiveram estouro da memória da máquina durante os testes em todas as instâncias, foram a de Pedrosa (2019), Reis2 e Reis3.

Comparando Reis3, que tem o objetivo de maximizar o menor nível e minimizar o maior nível, com a primeira política de Silva Filho (2021), que também controla as duas extremidades dos níveis, neste caso através da diferença entre os níveis, a política de Reis3 resolve quase sempre mais rápido que a SF1. Sendo assim, Reis3, por apresentar um bom tempo de resposta para todas as instâncias e por controlar duas variáveis, pode ser considerada uma melhor opção na ótica do tempo de processamento que Pedrosa(2019) e Reis2.

Em relação à qualidade do processo, do equilíbrio dos níveis dos silos ao longo do

tempo, as políticas de Caldas e Martins (2018) e a política SF1 de Silva Filho (2021) apresentaram os melhores resultados visando o controle dos níveis. A política Reis2 e a de Pedrosa (2019), apresentaram os piores resultados neste quesito, deixando silos esvaziar ou encher por completo. A política Reis1, embora tenha apresentado um bom resultado, para as instâncias com quatro silos, em relação ao equilíbrio dos níveis, nos testes com 6 silos ela deixou com que os silos se esvaziem ao longo do tempo. Reis3, não apresentou um equilíbrio tão bom quanto a primeira política de Silva Filho (2021).

A política Reis4, apresenta melhor resultado que a segunda de Silva Filho (2021), a SF2. As duas controlam o movimento do tripper, gerando economia de energia, mas a Reis4 além de também controlar os níveis, evitando o transbordo e o esvaziamento, mostrou nos testes realizados um maior equilíbrio ao longo do processo.

Como sugestão para trabalhos futuros, além da possibilidade de modificar a função objetivo, com o intuito de verificar novas possibilidades para a resolução do problema, pode-se criar novas instâncias, alterando por exemplo a vazão de entrada e saída de material, fazendo com que o sistema não esteja mais em equilíbrio constante. Outro ponto que pode ser explorado é a alteração da quantidade de silos, períodos e os limites máximos e mínimos do volume dos compartimentos, pois essas características interferem diretamente na resolução do problema. Em relação à modelagem, sugere-se ainda a criação de uma nova abordagem, em que o nível médio dos silos possa ser considerado como um alvo, para que outras variáveis de decisão possam ser incorporadas ao processo de decisão, como por exemplo, a vazão de entrada do sistema.

REFERÊNCIAS

MIGUEL, P.; MORABITO, R.; PUREZA, V. *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção*. [S.2.]: Elsevier Brasil, 2012.

CALDAS, F. N. Proposta para a solução do problema de movimentação de tripper. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018.

CALDAS, F. N.; MARTINS, A. X. Proposed solutions to the tripper car positioning problem. In: INSTICC. Proceedings of the 20th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 1: ICEIS. [S.1.]: SciTePress, 2018. p. 344–352. ISBN 978-989-758-298-1.

PEDROSA, L. d. O. M. Problema de movimentação do carro tripper-comparação de novas políticas. Monografia (Monografia (Bacharel em Engenharia de Produção)), João Monlevade, Minas Gerais, Brasil, 2019.

MORAIS, B. S. d. Problema de movimentação de tripper abordado por programação dinâmica. Monografia (Monografia (Bacharel em Engenharia de Produção)), João Monlevade, Minas Gerais, Brasil, 2019.

SILVA FILHO, E. S. d. Modelos matemáticos e métodos heurísticos para a otimização da movimentação de tripper. Monografia (Monografia (Mestre em Engenharia de Produção)), João Monlevade, Minas Gerais, Brasil, 2019.