



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia de Produção



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

### **Problema de movimentação do carro tripper - comparação de novas políticas**

**Luciana de Oliveira Murta Pedrosa**

João Monlevade, MG  
2019

**Luciana de Oliveira Murta Pedrosa**

**Problema de movimentação do carro tripper -  
comparação de novas políticas**

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.

Orientador: Prof. Alexandre Xavier Martins

**Universidade Federal de Ouro Preto  
João Monlevade  
2019**

P372p

Pedrosa, Luciana .

Problema de movimentação do carro tripper [manuscrito]: comparação de novas políticas / Luciana Pedrosa. - 2019.

38f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Martins.

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

1. Pesquisa Operacional. 2. Ferro - Minas e mineração. 3. Processo decisório.  
I. Martins, Alexandre. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 519.8



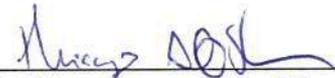
## ANEXO V

### ATA DE DEFESA – ATV030

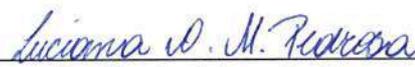
Aos 09 dias do mês de julho de 2019, às 19 horas, na sala H203 deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pela aluna Luciana de Oliveira Murta Pedrosa, Matrícula 14.1.8216 sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Alexandre Xavier Martins, Thiago Augusto de Oliveira Silva e Tatiana Alves Costa. A aluna apresentou o trabalho intitulado: “Problema de movimentação do carro tripper - comparação de novas políticas”. A comissão examinadora deliberou, pela: (X) Aprovação; ou ( ) Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções: \_\_\_\_\_; ou ( ) Reprovação com Ressalva, com prazo para marcação da nova banca de: \_\_\_\_\_; ou ( ) Reprovação da aluna, com a nota 9,5. Na forma regulamentar e seguindo as determinações da Resolução COEP 05/2018 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela aluna.

João Monlevade, 09 de julho de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Alexandre Xavier Martins

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Thiago Augusto de Oliveira Silva

  
\_\_\_\_\_  
Prof. (a) Tatiana Alves Costa

  
\_\_\_\_\_  
Luciana de oliveira Murta Pedrosa

## **TERMO DE RESPONSABILIDADE**

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Problema de movimentação do carro tripper - comparação de novas políticas**” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 09 de julho de 2019

*Luciana O. M. Pedrosa*

---

**Luciana de Oliveira Murta Pedrosa**

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por sempre iluminar meu caminho, concebendo muita saúde e sabedoria para que eu realize meus sonhos.

Aos meus pais, meus maiores exemplos de pessoas e profissionais, por todo apoio e às minhas irmãs por despertarem em mim a vontade de ser cada dia melhor.

À República TPM por toda amizade e incentivo durante a graduação.

Ao meu orientador Alexandre Xavier pelo companheirismo, paciência e confiança neste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto, professores, funcionários e amigos, essenciais ao longo da minha graduação.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
1.1.1	Objetivos gerais	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
<b>1.2</b>	<b>Justificativa e relevância do trabalho</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Pesquisa Operacional na mineração</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Programação Linear</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Proposta para Solução do Problema de Movimentação de Tripper</b>	<b>13</b>
2.3.1	Método de solução	14
2.3.2	Modelo matemático	14
2.3.2.1	Parâmetros das instâncias	15
2.3.2.2	Variáveis de Decisão	16
2.3.2.3	Função Objetivo	16
2.3.2.4	Restrições	16
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DO PROCESSO</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Conceitualização do problema</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Modificando o modelo</b>	<b>19</b>
4.2.1	Função Objetivo	20
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Comparação entre os tempos de resolução</b>	<b>21</b>
5.1.1	Instâncias equilibradas	22
5.1.2	Instâncias desequilibradas	24
<b>5.2</b>	<b>Comparação entre as propostas de estabilização do nível dos silos</b>	<b>27</b>
5.2.1	Instâncias equilibradas	27
5.2.2	Instâncias desequilibradas	31
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>37</b>

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama exemplificando um processo de peneiramento de minério granulado. . . . .	12
Figura 2 – Grafo representando as possibilidades de movimentação do tripper ao longo das interações . . . . .	15
Figura 3 – Dados de entrada . . . . .	15
Figura 4 – Variáveis de Decisão . . . . .	16
Figura 5 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com quatro silos . . . . .	28
Figura 6 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com seis silos . . . . .	29
Figura 7 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com nove silos . . . . .	30
Figura 8 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com dezesseis silos . . . . .	31
Figura 9 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com quatro silos . . . . .	32
Figura 10 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com seis silos . . . . .	33
Figura 11 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com nove silos . . . . .	34
Figura 12 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com dezesseis silos . . . . .	35

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Processamento dos sistemas equilibrados com quatro silos . . . . .	22
Tabela 2 – Processamento dos sistemas equilibrados com seis silos . . . . .	22
Tabela 3 – Processamento dos sistemas equilibrados com nove silos . . . . .	23
Tabela 4 – Processamento dos sistemas equilibrados com dezesseis silos . . . . .	24
Tabela 5 – Processamento dos sistemas desequilibrados com quatro silos . . . . .	25
Tabela 6 – Processamento dos sistemas desequilibrados com seis silos . . . . .	25
Tabela 7 – Processamento dos sistemas desequilibrados com nove silos . . . . .	26
Tabela 8 – Processamento dos sistemas desequilibrados com dezesseis silos . . . . .	26

# Resumo

As técnicas da Pesquisa Operacional vêm sendo incorporadas às mineradoras para apoiar a tomada de decisão. Segundo (BARBOZA, 2005), o setor de minério de ferro brasileiro foi um dos setores que mais obteve retornos significativos com a aplicação da técnica em suas operações.

Este trabalho aborda um problema presente no processo de beneficiamento de minério de ferro onde há a utilização do carro tripper na distribuição do material entre os silos de armazenamento. A finalidade deste é desenvolver uma nova política de movimentação do carro e compará-la ao modelo formulado por (CALDAS, 2018), autor que introduziu o problema na literatura. O método utilizado é a Programação Linear Inteira Mista modelado no software Lingo 10.0 com interação com o MS Excel 2010. Devido à natureza combinatória dos modelos implementados, o tempo computacional despendido na resolução mostrou-se excessivo e por esse motivo foi limitado à uma hora de resolução. O trabalho justifica-se pela carência de literatura sobre o tema abordado e de lógicas que traduzam a estratégia produtiva de forma eficiente, contribuindo assim para a competitividade das mineradoras. Foram criadas 60 instâncias para implementar os modelos e permitir a comparação entre os tempos de processamento e comportamento dos processos das políticas.

**Palavras-chave:** Pesquisa Operacional, mineração, carro tripper.

# Abstract

Operational Research techniques have been incorporated into mining companies to support decision making. According to (BARBOZA, 2005), the Brazilian iron ore sector was one of the sectors that obtained the most significant returns with the application of the technique in its operations.

This work addresses a problem present in the process of iron ore processing where there is the use of the tripper car in the distribution of the material between the storage silos. The purpose of this is to develop a new policy of car movement and compare it to the model formulated by (CALDAS, 2018), author who introduced the problem in the literature. The method used is Linear Integer Mixed Programming modeled in Lingo 10.0 software with interaction with MS Excel 2010. Due to the combinatorial nature of the implemented models, the computational time spent in the resolution was excessive and for that reason was limited to one hour of resolution. The work is justified by the lack of literature on the topic addressed and of logics that translate productive strategy efficiently, thus contributing to the competitiveness of mining companies. Sixty instances have been created to implement the models and to allow comparison between processing times and behavior of policy processes.

**Keywords:** Operational Research, mining, tripper car.

# 1 Introdução

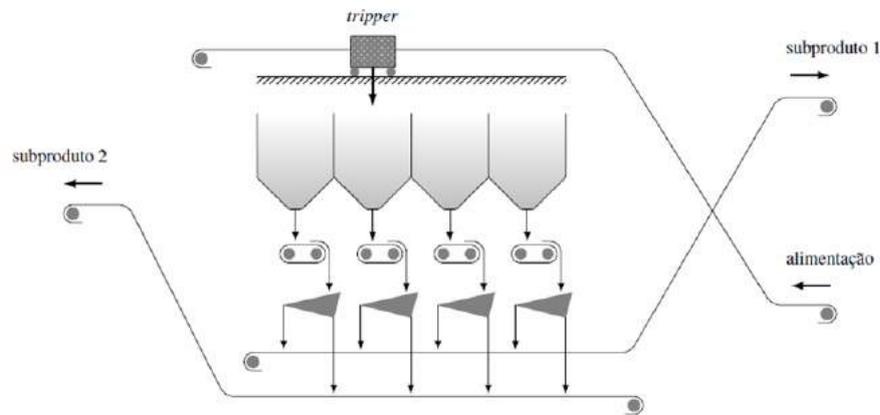
O setor brasileiro de mineração possui grande influência na economia do país, sendo o minério de ferro um dos principais produtos exportados (ANTAQ, 2008). Tamanho volume de exportação se dá em função da qualidade do minério brasileiro, traduzida em um teor médio de ferro de 64% e, após beneficiado, 67,5% (BNDES, 2010).

O processo de beneficiamento do minério passa por diversas etapas sendo necessário, entre algumas delas, a estocagem do produto. Existem diversas maneiras de se estocar o minério, variando de acordo com a finalidade da etapa do processo. A estocagem em silos é ideal quando se trata de estoques intermediários nos quais a quantidade de produto é moderada e destina-se ao processo seguinte em um curto intervalo de tempo (CHAVES, 2016). A etapa seguinte é realizada por um ou mais alimentadores, variando conforme o volume processado, que são responsáveis pela retirada do material estocado. Assim, o silo deve ter o número de compartimentos de acordo com o número de alimentadores. Para que o material chegue até os silos são utilizadas correias transportadoras que, como o próprio nome remete, são responsáveis por transportar o produto durante todo o processo de beneficiamento. Para realizar a descarga de material nos diversos compartimentos dos silos é utilizado um equipamento denominado tripper. Este funciona como um desviador acoplado sobre trilhos de forma a se mover ao longo da correia (CAMPOS, 2014).

De acordo com (BOYER, 2010) o carro tripper se move de forma longitudinal por meio do acionamento de motores elétricos ligadas às rodas que caminham sobre os trilhos. Porém, a sequência de movimento do carro bem como o posicionamento sobre os compartimentos que ele irá descarregar é realizada de forma aleatória ou programada de forma simples, ou seja, não há uma lógica que contribua para uma estratégia de produção. A Figura 1 ilustra o sistema silo-tripper na mineração onde o silo se desloca sobre a correia que alimenta o sistema, e distribui material para os quatro compartimentos do silo. Abaixo de cada um dos silos há um alimentador de correia que, por sua vez, direciona o material para peneiras, representadas por triângulos.

Neste sentido é crescente a demanda por tecnologias relacionadas à produtividade dos processos de beneficiamento do minério. Dentre as áreas de influência, na qual há a necessidade de estudos e pesquisas, destaca-se a Pesquisa Operacional. Para o problema de movimentação do carro tripper na mineração faz-se necessário o teste de diferentes instâncias e objetivos a fim de analisar o comportamento do processo.

Figura 1 – Diagrama exemplificando um processo de peneiramento de minério granulado.



Fonte: (CALDAS, 2018)

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo comparar políticas de movimentação do carro tripper em sistemas de mineração baseadas no modelo matemático de (CALDAS, 2018).

### 1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Estudar a literatura de modelos em problemas de movimentação do carro tripper;
- ✓ Compreender o problema de movimentação do carro tripper em sistemas de mineração;
- ✓ Implementar um modelo da literatura;
- ✓ Desenvolver alternativas para a função objetivo do modelo;
- ✓ Criar instâncias testes;
- ✓ Comparar o modelo em relação aos tempos de resolução e à qualidade da solução.

## 1.2 Justificativa e relevância do trabalho

A realização do trabalho em questão justifica-se pela carência de literatura sobre o tema abordado e de sistemas inteligentes de movimentação de carro tripper em processos da mineração.

## 2 Revisão da literatura

### 2.1 Pesquisa Operacional na mineração

A característica multidisciplinar da Pesquisa Operacional somada ao auxílio à tomada de decisão permite que esta área seja aplicada às organizações com o objetivo de resolver seus problemas de complexidade. Na mineração, temos como exemplos de aplicação, os problemas apresentados por (MERSCHMANN, 2002) e (PINTO et al., 2003) que se referem à alocação de equipamento de carga a ser realizada de modo a utilizar ao máximo sua capacidade produtiva e o sistema de alocação de equipamentos de transporte, respectivamente. Os autores (CHANDA; DAGDELEN, 1995) utilizaram a Pesquisa Operacional para desenvolver um modelo de programação linear por metas para um problema de mistura de minério de carvão. Já (MORAES et al., 2006) sugere um modelo, também baseado na programação linear por metas, para otimizar a composição dos lotes de minério de ferro da Mina Cauê, pertencente à Vale S.A. em Itabira, Minas Gerais.

### 2.2 Programação Linear

Dentre as técnicas da Pesquisa Operacional, a programação linear caracteriza-se pela habilidade de modelar problemas importantes e complexos da realidade (BARBOZA, 2005).

Por meio da "Função Objetivo", a programação linear busca otimizar recursos limitados disponíveis no processo estudado para atender o objetivo estabelecido (DATTA et al., 2007 apud SOUZA et al., 2014). Para o melhor resultado obtido, dá-se o nome de "Solução Ótima"(ANDRADE et al., apud SOUZA et al., 2014).

Também fazem parte desses modelos as "Restrições"que representam as relações de interdependência entre as variáveis de decisão por meio de equações e inequações (BARBOZA, 2005). Segundo o autor, quando essas variáveis assumem apenas valores inteiros temos a Programação Linear Inteira, caso contrário, chama-se de Programação Linear Inteira Mista modelos que possuem variáveis tanto inteiras quanto contínuas.

### 2.3 Proposta para Solução do Problema de Movimentação de Tripper

A otimização da movimentação do carro tripper com o objetivo de maximizar o material nos silos ao longo do tempo foi introduzido na literatura por (CALDAS, 2018).

Segundo o autor, o problema de movimentação de trippers, equipamentos utilizados em processos de beneficiamento de minério, é definido pela determinação do posicionamento do carro sobre os compartimentos do silo ao longo do tempo de operação. Utilizou-se a programação linear com o objetivo de encontrar a movimentação ótima do tripper.

### 2.3.1 Método de solução

Como ponto de partida para trabalhar o problema de movimentação do carro tripper, (CALDAS, 2018) formulou modelos matemáticos que representam o deslocamento do equipamento sobre os compartimentos do silo. Para isso, utilizou a programação linear inteira mista e baseou-se no princípio *MinMax*, apresentado por (RICH; KNIGHT, 1991).

### 2.3.2 Modelo matemático

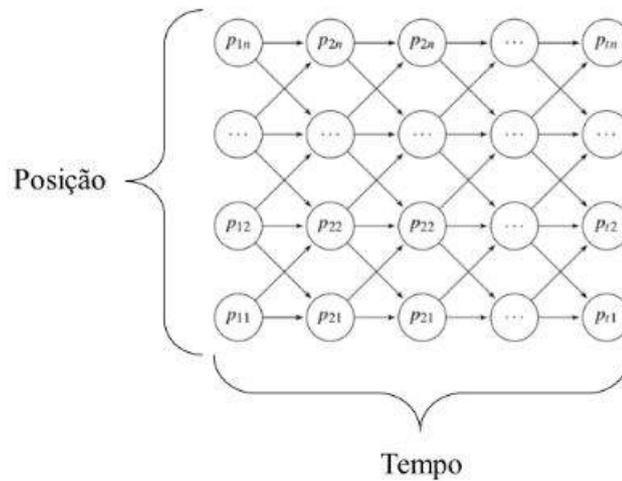
(CALDAS, 2018) formula o modelo de otimização analisando os dados de entrada das instâncias, as variáveis de decisão, as restrições e a função objetivo.

Em relação à posição do tripper, o autor define as seguintes premissas:

- o equipamento só pode se mover para as posições adjacentes a que se encontra ou permanecer na que está localizado;
- movimentar-se para uma posição não adjacente, significa alimentar os compartimentos que se encontram entre o ponto de partida e de destino do tripper;
- o processo de posicionamento do equipamento possui dependência temporal, uma vez que a velocidade é finita;
- a velocidade de movimentação do equipamento é constante;
- a alimentação do tripper, feita pela correia transportadora, ocorre de forma ininterrupta;
- os níveis dos compartimentos do silo devem ser limitados conforme restrições de capacidade do mesmo;
- a decisão de movimentação é definida como a escolha de uma sequência de ações de deslocamento do tripper ao longo de uma janela finita de tempo.

A Figura 2 esquematiza as possibilidades de posição do tripper no modelo desenvolvido, onde  $p$  é o conjunto de posições possíveis,  $n$  é o número de compartimentos do silo que representa a posição do equipamento e  $t$  é a janela de tempo futuro.

Figura 2 – Grafo representando as possibilidades de movimentação do tripper ao longo das interações



Fonte: Adaptado de (CALDAS, 2018)

Com a comparação de políticas de movimentação pode-se obter sequências eficientes de posicionamento do tripper e, conseqüentemente, ganhos produtivos para o setor da mineração contribuindo para a competitividade das empresas do ramo.

### 2.3.2.1 Parâmetros das instâncias

A Figura 3 descreve os dados de entrada do modelo de (CALDAS, 2018), sendo que o autor considerou a quantidade de massa que entra e que sai constante.

Figura 3 – Dados de entrada

Parâmetro	Descrição
$T$	Conjunto de movimentos
$P$	Conjunto de silos
$n$	Número de silos
$t$	Número de passos
$L_i$	Nível inicial
$l_{\max}$	Nível máximo
$l_{\min}$	Nível mínimo
$q$	Massa de entrada
$Q$	Massa de saída
$K$	Taxa de esvaziamento
$p$	Posição inicial

Fonte: (CALDAS, 2018)

### 2.3.2.2 Variáveis de Decisão

"A representação das alternativas de manejo para um dado problema é feita com uma variável de decisão  $X_{ij}$  para representar a alternativa de manejo  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), assinalada à unidade de manejo  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ )" (LOPES et al., 2004, pag.249).

Para o modelo em questão, (CALDAS, 2018) definiu cinco variáveis conforme Figura 4.

Figura 4 – Variáveis de Decisão

Variável	Descrição
<b>X</b>	Posições do <i>tripper</i>
<b>A</b>	Folga de nível baixo
<b>B</b>	Folga de nível alto
<b>L</b>	Nível
<b>Z</b>	Auxiliar para <i>MinMax</i>

Fonte:(CALDAS, 2018)

As matrizes **A** e **B** representam variáveis de folga de forma a transformar as restrições do problema de programação linear de inequações em equações, evitando assim que uma instância fora dos limites gere erro ao compilar o modelo.

### 2.3.2.3 Função Objetivo

A função objetivo foi baseada no princípio *MinMax* (RICH; KNIGHT, 1991 apud CALDAS, 2018). No caso do modelo estudado, busca-se a maximização do menor valor dentre os níveis do silo a cada interação, de forma que não falte minério em nenhum dos compartimentos em nenhum momento.

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

### 2.3.2.4 Restrições

1. Garante que o auxiliar *MinMax*  $Z$  pegue o estado de menor nível, representado pela letra  $L$ , dos compartimentos do silo  $P$  ao longo das interações  $T$ . (2.1)
2. Garante que a posição  $X$  do tripper seja única em determinada interação  $T$ . (2.2)
3. Caracteriza o movimento do tripper. (2.3) (2.4) (2.5)
4. Define a posição inicial do tripper. (2.6)
5. Define o nível inicial do silo. (2.7)
6. Define a folga de nível alto. (2.8)

7. Define a folga de nível baixo. (2.10)
8. Garante o acúmulo de material. (2.12)
9. Restringe o nível a um limite máximo. (2.13)
10. Restringe o nível a um limite mínimo. (2.14)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$L_{i,j} \geq l_{min}, \forall i \in P, j \in T \quad (2.14)$$

## 3 Metodologia

A definição da metodologia do trabalho em questão será baseada em alguns conceitos da literatura relacionados à natureza, aos objetivos, abordagem e métodos utilizados para realização da pesquisa.

Partindo do conceito trazido por (ANDRADE; MARTINS, 2005), a pesquisa de natureza aplicada caracteriza-se pela busca de soluções de problemas claramente definidos. Neste caso, a busca de alternativas para a função objetivo e comparação quanto à qualidade da solução se justificam. A fonte de dados utilizada para apoiar a pesquisa será secundária, ou seja, informações contidas em livros e artigos.

Quanto aos objetivos do problema, pode-se classificar a pesquisa como exploratória, uma vez que visa aprofundar o tema por meio de visitas e/ou construção de hipóteses, como explicativa, na qual sugere a identificação de fatores determinantes que contribuem na ocorrência de fenômenos, buscando as suas causas, e, por fim, como pesquisa normativa pois é direcionada para o aperfeiçoamento de resultados disponíveis em literatura.(CAUCHICK et al., 2011).

Em relação à abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa, uma vez que se utilizarão recursos de cunho matemáticos e que, posteriormente, serão analisados e interpretados os resultados numéricos gerados. De acordo com (CAUCHICK et al., 2011), a pesquisa de cunho quantitativo baseia-se na possibilidade de elaborar modelos que simulem processos concretos ou parte deles. Descreve ainda a relação de causa entre as variáveis do modelo, ou seja, a influência que uma variável exerce sobre a outra.

Por fim, o método empregado será a modelagem e simulação. Segundo o (CAUCHICK et al., 2011), um modelo é a representação de uma circunstância ou vida real de forma sistemática que permite compreender melhor a situação em questão sendo, neste caso, o comportamento do tripper.

Para trabalhar o modelo, será utilizado o software LINGO por ser uma ferramenta simples de otimização linear ou não linear para formular problemas grandes concisamente, resolvê-los e analisar a solução. A leitura dos dados será feita diretamente em uma planilha do Excel, os quais serão gerados de forma aleatória. Visitas técnicas em uma mineradora onde se utiliza o sistema silo-tripper também serão realizadas em prol de uma maior riqueza de informações e melhor visualização do problema.

## 4 Modelagem do processo

### 4.1 Conceitualização do problema

O problema em estudo compreende analisar o processo de movimentação do carro tripper, utilizados em sistemas de mineração, ao implementar diferentes instâncias e variar a função objetivo.

O alimentador móvel é uma máquina que desloca sobre silos horizontais para abastecê-los conforme apresentado na Figura 1. O mesmo faz o abastecimento dos silos priorizando basicamente o silo mais vazio. Devido às variações no processo da usina de beneficiamento de minério, os silos não têm consumo uniforme, gerando níveis diferentes, que requerem um comportamento diferenciado de abastecimento. Outro fator que gera diferenças nos níveis dos silos são as paradas individuais das linhas do processo, devido a outras interferências, tais como manutenções corretivas e/ou preventivas. Em caso de silos com nível muito alto, ou em que o alimentador do mesmo esteja parado, é necessário interromper o fluxo de minério para que o alimentador móvel possa transladar por cima desses silos.

O modelo de (CALDAS, 2018), por meio da programação linear inteira mista, representa o problema real mencionado, porem considera que o fluxo de alimentação dos silos é contínuo. Isso porque, a finalidade da modelagem é capturar o que é realmente relevante para o estudo, evitando complexidades.

O objetivo do modelo apresentado é tentar fazer com que não falte minério em nenhum dos silos, ou seja, tentar manter os o silos em equilíbrio a todo o momento. Para isso, (CALDAS, 2018) utilizou a função que maximiza o somatório do nível mínimo dos silos. Em contrapartida, no modelo alterado o objetivo é o mesmo mas verifica se as alterações feitas o torna mais ou menos complexo e se o comportamento do tripper e as quantidades de minério nos silos são satisfatórias.

### 4.2 Modificando o modelo

Para o desenvolvimento desse trabalho vamos basear no modelo de (CALDAS, 2018), porem iremos retirar algumas restrições e adicionar outras, além de alterar a função objetivo.

As restrições 2.8 e 2.9, folga de nível alto, e 2.10 e 2.11, folga de nível baixo, serão retiradas do modelo e fixaremos o valor da taxa de esvaziamento,  $K$ , a um. A restrição 2.12, acúmulo de matéria, será adaptada para o novo modelo.

Dessa forma, trabalharemos com o seguinte modelo:

$$X_{i,j} \leq X_{i-1,j-1} + X_{i,i-1} + X_{i+1,j-1}, \forall i \in [2, n-1m], j \in [2, t] \quad (4.1)$$

$$X_{1,j} \leq X_{1,j-1} + X_{2,j-1}, \forall j \in [2, t] \quad (4.2)$$

$$X_{n,j} \leq X_{n,j-1} + X_{n-1,j-1}, \forall j \in [2, t], \quad (4.3)$$

$$X_{p,1} = p \quad (4.4)$$

$$L_{i,1} = L_1, \forall i \in T \quad (4.5)$$

$$K_i = 1 \quad (4.6)$$

$$L_{i,j+1} = L_{i,j} + (q \cdot X_{i,j} - Q_i) + A_{i,j} - B_{i,j}, \forall i \in P, j \in [1, t-1] \quad (4.7)$$

$$L_{i,j} \leq l_{max}, \forall i \in P, j \in T \quad (4.8)$$

$$L_{i,j} \geq l_{min}, \forall i \in P, j \in T \quad (4.9)$$

### 4.2.1 Função Objetivo

$$\max \quad C + \sum_{i \in P, j \in T} A_{i,j} - \sum_{i \in P, j \in T} B_{i,j}$$

A nova função objetivo retorna o menor nível atingido do silo em um determinado período de tempo.

## 5 Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados e comparados os tempos de processamento das instâncias testes do modelo de (CALDAS, 2018) e do novo modelo criado. A comparação entre os tempos dos modelos justifica-se por cada um deles trabalhar com funções diferentes, sendo o modelo de (CALDAS, 2018) representado pela função F01, que maximiza o somatório dos mínimos, e a nova função representada por F0, a qual retorna o menor valor de todos.

As execuções dos testes foram feitas em um computador com processador Intel Core i5 com velocidade de 2.40 GHz, memória RAM de 6GB e 500GB de HD com o sistema operacional Windows sete Ultimate (64 bits). Para modelar, foi utilizado o software Lingo 10.0 interagindo com o software MS Excel 2010. Os dados de entrada são registrados no Excel, o Lingo utiliza esses dados para resolver o problema e retorna ao Excel os resultados obtidos.

Foram criadas sessenta instâncias testes e as mesmas foram implementadas uma a uma em cada um dos modelos, a fim de obter e analisar o tempo de resolução de cada uma e o comportamento dos sistemas.

Os testes foram feitos levando em conta sistemas com 4, 6, 9 e 16 silos, em intervalos de tempo de  $T = 20, 40$  e  $60$  unidades de tempo. A posição inicial do tripper  $p$  variou, aleatoriamente, sobre o número de silos. Os valores mínimos  $l_{min}$  e máximo  $l_{max}$  do nível de cada silo variou entre zero e 100, respectivamente, e os níveis iniciais  $L_i$  de cada silo variou dentro desses limites. Foram feitos teste com a massa de entrada  $q$  em equilíbrio, ou seja, igual ao número de silos, e de forma desequilibrada. A taxa de esvaziamento foi mantida em uma unidade. Para cada combinação, foram implementadas cinco instâncias diferentes.

Como solução, o problema retornava a posição do tripper  $X$  e o nível  $L$  de cada silo em cada unidade de tempo, além do valor auxiliar  $Z$  e da função objetivo.

Obteve-se então um total de 240 soluções, sendo 120 de cada modelo (60 equilibradas e 60 desequilibradas), e o tempo de máximo de processamento das instâncias foram limitados à uma hora.

### 5.1 Comparação entre os tempos de resolução

Os tempos de processamento das instâncias testes serão apresentados em tabelas formadas pelos sistemas definidos e o respectivo tempo de cada modelo. A nomenclatura do sistema refere-se: número de silos\_intervalo de tempo\_número de referência da instância.

### 5.1.1 Instâncias equilibradas

São consideradas instâncias equilibradas aquelas em que o número de compartimentos do silo que compõe o sistema é igual ao número que corresponde à massa de entrada do mesmo.

Tabela 1 – Processamento dos sistemas equilibrados com quatro silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
4_20_1	00:00:02	00:00:07
4_20_2	00:00:03	00:00:20
4_20_3	00:00:01	00:00:01
4_20_4	00:00:01	00:00:01
4_20_5	00:00:02	00:00:06
4_40_1	00:00:01	00:01:00
4_40_2	00:00:02	00:01:02
4_40_3	00:00:12	00:26:38
4_40_4	00:00:02	00:10:58
4_40_5	00:00:07	00:08:02
4_60_1	00:00:01	01:00:00
4_60_2	00:00:05	01:00:00
4_60_3	00:00:02	00:31:27
4_60_4	00:00:06	00:20:34
4_60_5	00:00:04	01:00:00
Média	00:00:03	00:20:00

A Tabela 1 considera um conjunto de sistemas equilibrados compostos por quatro silos. Como resultado dos tempos obtidos, temos que em 86,67% das comparações a função F0 foi mais rápida, ou seja, apresentou tempo de processamento menor em relação às instâncias de F01. Além disso, a média de tempo do conjunto confirma a discrepância entre o tempo dos sistemas de cada modelo individualmente.

Tabela 2 – Processamento dos sistemas equilibrados com seis silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
6_20_1	00:00:01	00:00:09
6_20_2	00:00:01	00:00:05
6_20_3	00:00:01	00:00:18
6_20_4	00:00:02	00:00:14
6_20_5	00:00:01	00:00:07
6_40_1	00:00:07	01:00:00
6_40_2	00:00:37	00:02:46
6_40_3	00:00:10	00:03:45
6_40_4	00:00:10	00:18:36
6_40_5	00:00:12	01:00:00

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
6_60_1	00:00:15	01:00:00
6_60_2	00:00:34	01:00:00
6_60_3	00:00:28	01:00:00
6_60_4	00:00:21	01:00:00
6_60_5	00:00:25	01:00:00
Média	00:00:14	00:29:44

A Tabela 2, a qual apresenta os tempos de processamento dos sistemas equilibrados com seis silos, mostra que em 100% das comparações o modelo F0 foi mais rápido. Enquanto os tempos individuais de F0 resultavam em torno de segundos, muitas instâncias processadas em F01 atingiram o tempo máximo de uma hora.

Tabela 3 – Processamento dos sistemas equilibrados com nove silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
9_20_1	00:00:03	00:00:11
9_20_2	00:00:02	00:00:08
9_20_3	00:00:04	00:00:17
9_20_4	00:00:01	00:00:13
9_20_5	00:00:01	00:00:07
9_40_1	00:00:37	00:58:30
9_40_2	00:00:57	00:26:21
9_40_3	00:00:14	00:12:38
9_40_4	00:00:09	01:00:00
9_40_5	00:00:13	01:00:00
9_60_1	00:01:42	01:00:00
9_60_2	00:34:05	01:00:00
9_60_3	01:00:00	01:00:00
9_60_4	00:01:04	01:00:00
9_60_5	00:01:36	01:00:00
Média	00:06:43	00:34:34

A Tabela 3 mostra os tempos de processamento dos sistemas equilibrados com nove silos e, assim como a Tabela 2, em 100% das comparações, F0 apresentou menor tempo com relação a F01. O aumento de três silos no sistema também fez com que a média dos tempos do conjunto se elevasse.

Tabela 4 – Processamento dos sistemas equilibrados com dezesseis silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
16_20_1	00:00:08	00:00:25
16_20_2	00:01:02	00:00:56
16_20_3	00:00:35	00:00:24
16_20_4	00:00:40	00:00:27
16_20_5	00:01:22	00:02:36
16_40_1	01:00:00	01:00:00
16_40_2	01:00:00	01:00:00
16_40_3	01:00:00	01:00:00
16_40_4	00:01:53	01:00:00
16_40_5	01:00:00	01:00:00
16_60_1	01:00:00	01:00:00
16_60_2	01:00:00	01:00:00
16_60_3	00:23:35	01:00:00
16_60_4	01:00:00	01:00:00
16_60_5	01:00:00	01:00:00
Média	00:33:57	00:40:19

Por fim, o processamento das instâncias formadas por sistemas com dezesseis silos, Tabela 4, também demonstrou que os tempos de F0 foram menores se comparado com F01 em 73,33% das comparações. A diferença entre as médias de tempo dos conjuntos ficou menor, pois o aumento do número de silos no sistema teve por consequência, o aumento do tempo de processamento e como o mesmo foi limitado à uma hora, o tempo dos modelos atingiram o limite em vários casos.

Como resultados da análise dos sistemas equilibrados como um todo, temos então que em 90% das comparações entre os tempos de processamento dos modelos, a função F0, a qual retorna o menor valor de todos, foi menor em relação a F01. O que demonstra maior agilidade na resolução do problema.

### 5.1.2 Instâncias desequilibradas

As instâncias desequilibradas são consideradas aquelas em que o número de silos que compõem um sistema é diferente do número que representa a massa de entrada desse sistema. No caso das instâncias testes dessa sessão, a massa de entrada dos sistemas variou aleatoriamente, sendo sempre menor que o número de silos.

Tabela 5 – Processamento dos sistemas desequilibrados com quatro silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
4_20_1	00:00:07	00:00:17
4_20_2	00:00:01	00:00:16
4_20_3	00:00:01	00:00:01
4_20_4	00:00:01	00:00:01
4_20_5	00:00:01	00:00:16
4_40_1	00:00:01	00:00:01
4_40_2	00:00:01	00:00:01
4_40_3	01:00:00	00:54:43
4_40_4	00:00:02	00:00:08
4_40_5	00:00:04	00:00:17
4_60_1	00:05:43	01:00:00
4_60_2	00:00:06	01:00:00
4_60_3	00:00:02	00:00:01
4_60_4	00:00:03	01:00:00
4_60_5	01:00:00	01:00:00
Média	00:08:25	00:19:44

A Tabela 5 demonstra que, mesmo com as instâncias desequilibradas, o tempo de processamento do modelo F0 permanece menor em relação a F01 para o conjunto de sistemas com quatro silos, representando 60% das comparações. A média dos tempos do modelo F0 aumentou com relação à média das instâncias equilibradas, enquanto que a média de F01 manteve-se próxima.

Tabela 6 – Processamento dos sistemas desequilibrados com seis silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
6_20_1	00:00:02	00:00:04
6_20_2	00:00:01	00:00:03
6_20_3	00:00:01	00:00:05
6_20_4	00:00:03	00:00:04
6_20_5	00:00:01	00:00:02
6_40_1	00:00:17	00:01:00
6_40_2	00:02:37	00:00:36
6_40_3	00:00:06	00:00:18
6_40_4	00:00:21	00:04:00
6_40_5	00:00:42	00:52:55
6_60_1	01:00:00	01:00:00
6_60_2	00:06:03	01:00:00
6_60_3	00:02:05	01:00:00
6_60_4	01:00:00	01:00:00
6_60_5	00:00:32	01:00:00
Média	00:08:51	00:23:56

Para o conjunto de sistemas desequilibrados com seis silos, Tabela 6, em 93,33% das comparações o modelo F0 foi mais rápido que F01. Se comparadas as médias obtidas com o conjunto de sistemas equilibrados, F0 apresentou aumento nos tempos, enquanto os tempos de F01 reduziram.

Tabela 7 – Processamento dos sistemas desequilibrados com nove silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
9_20_1	00:00:08	00:00:08
9_20_2	00:00:02	00:00:08
9_20_3	00:00:03	00:00:12
9_20_4	00:00:03	00:00:08
9_20_5	00:00:04	00:00:02
9_40_1	00:00:36	00:07:37
9_40_2	00:05:44	00:06:05
9_40_3	00:00:12	00:01:34
9_40_4	00:07:10	00:13:33
9_40_5	00:00:12	00:57:45
9_60_1	00:00:58	01:00:00
9_60_2	01:00:00	01:00:00
9_60_3	01:00:00	01:00:00
9_60_4	01:00:00	01:00:00
9_60_5	01:00:00	01:00:00
Média	00:17:01	00:25:49

De acordo com a Tabela 7, sistemas com nove silos, o percentual de comparações em que a função F0 foi mais rápida que a F01 caiu para 66,67%. Analisando também as médias, nota-se o aumento dos tempos de F0 e queda dos tempos de F01, se comparado com os sistemas equilibrados.

Tabela 8 – Processamento dos sistemas desequilibrados com dezesseis silos

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
16_20_1	00:00:28	00:00:15
16_20_2	00:00:20	00:00:12
16_20_3	00:00:55	00:00:37
16_20_4	00:00:29	00:00:26
16_20_5	00:00:10	00:00:11
16_40_1	01:00:00	01:00:00
16_40_2	01:00:00	01:00:00
16_40_3	01:00:00	01:00:00
16_40_4	00:18:53	01:00:00
16_40_5	01:00:00	01:00:00

Sistema	Tempo F0	Tempo F01
16_60_1	01:00:00	01:00:00
16_60_2	01:00:00	01:00:00
16_60_3	01:00:00	01:00:00
16_60_4	01:00:00	01:00:00
16_60_5	01:00:00	01:00:00
Média	00:37:25	00:40:07

Conforme foi analisado o aumento dos tempos do modelo de F0 e redução dos tempos de F01, a Tabela 8 apresenta como resultado das comparações que F01 foi mais rápido no conjunto composto por dezesseis silos, representando 53,33% das comparações. A média entre os tempos dos modelos também demonstra esse comportamento pelo fato de estarem mais próximas.

Concluindo as análises dos tempos dos sistemas desequilibrados, pudemos verificar que o desequilíbrio das instâncias afetou de forma significativa o desempenho da resolução do modelo F0, representando uma queda de 90% para 66,67% das comparações nas quais ele foi mais rápido. Em contra partida, F01 tornou-se mais rápido em decorrência do desequilíbrio entre o número de silos e da massa de entrada do sistema, representando um aumento de 6,67% para 25%.

Analisando as instâncias testes trabalhadas como um todo, não separando as equilibradas das desequilibradas, pode-se confirmar então que o modelo F0 possui tempo de resposta mais rápido em relação a F01. Do total de cento e vinte comparações entre os tempos obtidos, F0 foi mais rápido em 78,33% dos tempos, enquanto F01 em apenas 15,83%. O restante de 5,83% dos tempos atingiu o limite máximo de uma hora.

## 5.2 Comparação entre as propostas de estabilização do nível dos silos

A segunda comparação será feita entre a proposta de estabilização e maximização do menor nível a cada interação, demonstrada por (CALDAS, 2018), e à nova função objetivo proposta para o problema, em relação ao comportamento do processo e equilíbrio do nível dos silos.

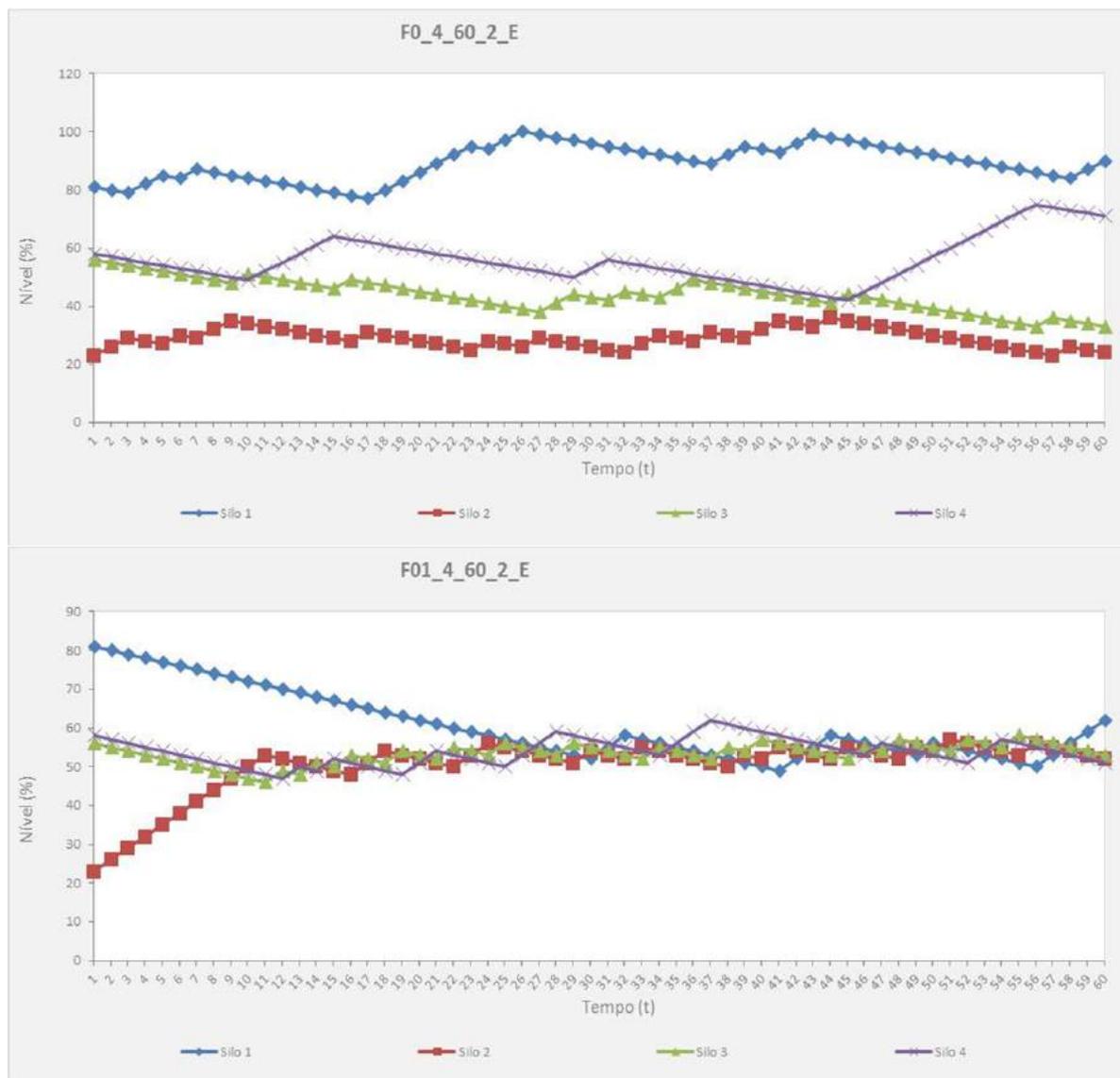
O desempenho do processo será representado por meio de gráficos que demonstram o nível dos silos a cada unidade de tempo.

### 5.2.1 Instâncias equilibradas

Para a primeira comparação, foi considerado o sistema composto por quatro silos durante o intervalo de sessenta unidades de tempo. O tempo de processamento da instância

equilibrada foi igual a 5 segundos para F0 e 1 hora para F01.

Figura 5 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com quatro silos



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

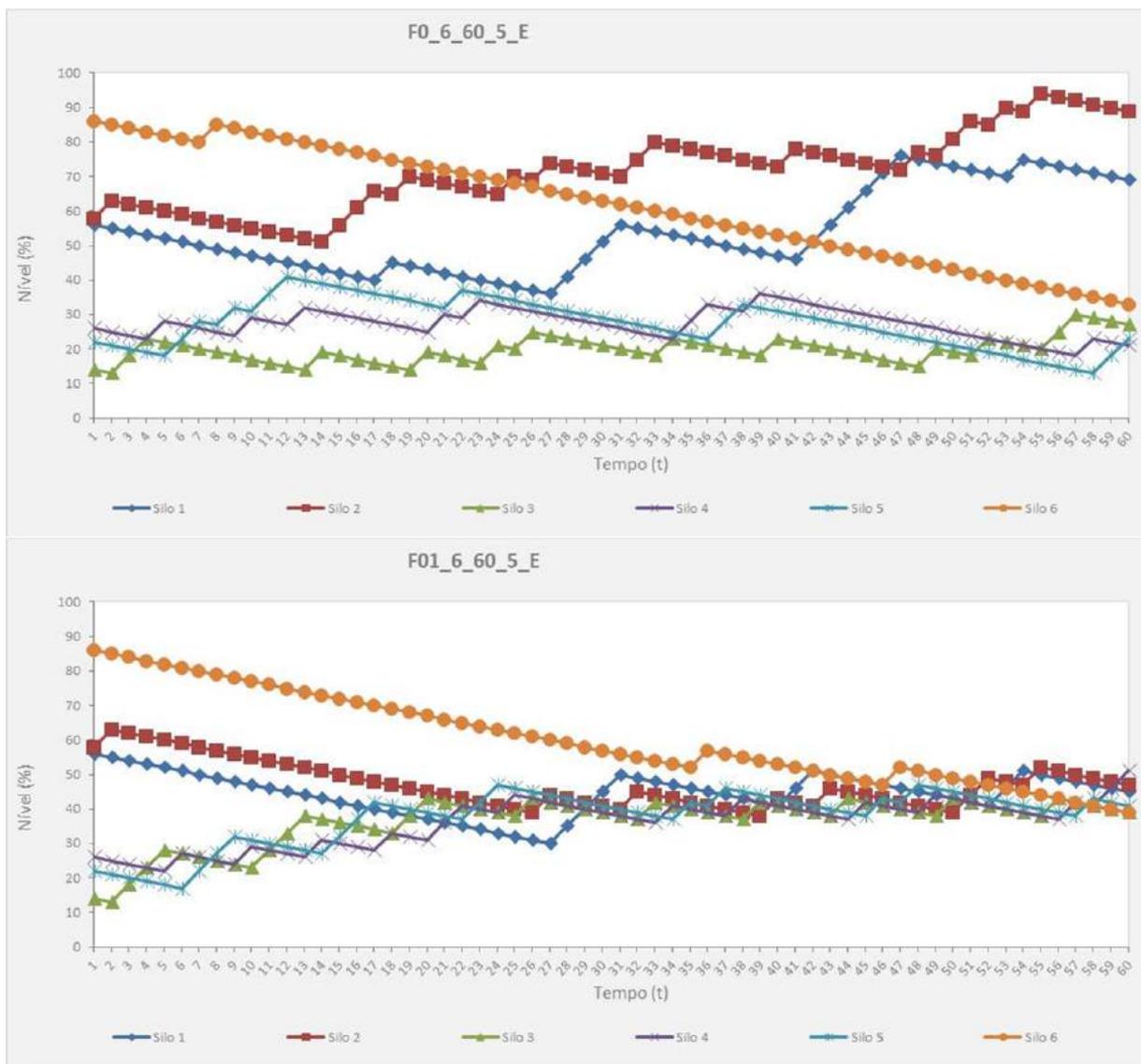
No sistema da Figura 5, é visível a discrepância entre a variabilidade dos níveis dos modelos. Enquanto a média de variação dos níveis da função F0 foi igual a 60,27%, a média de F01 foi de 13,63%, ou seja, os níveis de F01 tendem a se estabilizarem em valores mais próximos.

Segundo a estratégia de estabilização de (CALDAS, 2018) para manter os níveis dentro de uma faixa aceitável de  $20\% \leq L \leq 80\%$ , o modelo F0 não atenderia à estratégia uma vez que os níveis variaram entre  $28,97\% \leq L \leq 89,23\%$ .

A Figura 6 considera o sistema composto por seis silos durante o intervalo de sessenta unidades de tempo. O tempo de processamento da instância equilibrada foi igual

a 25 segundos para F0 e 1 hora para F01.

Figura 6 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com seis silos



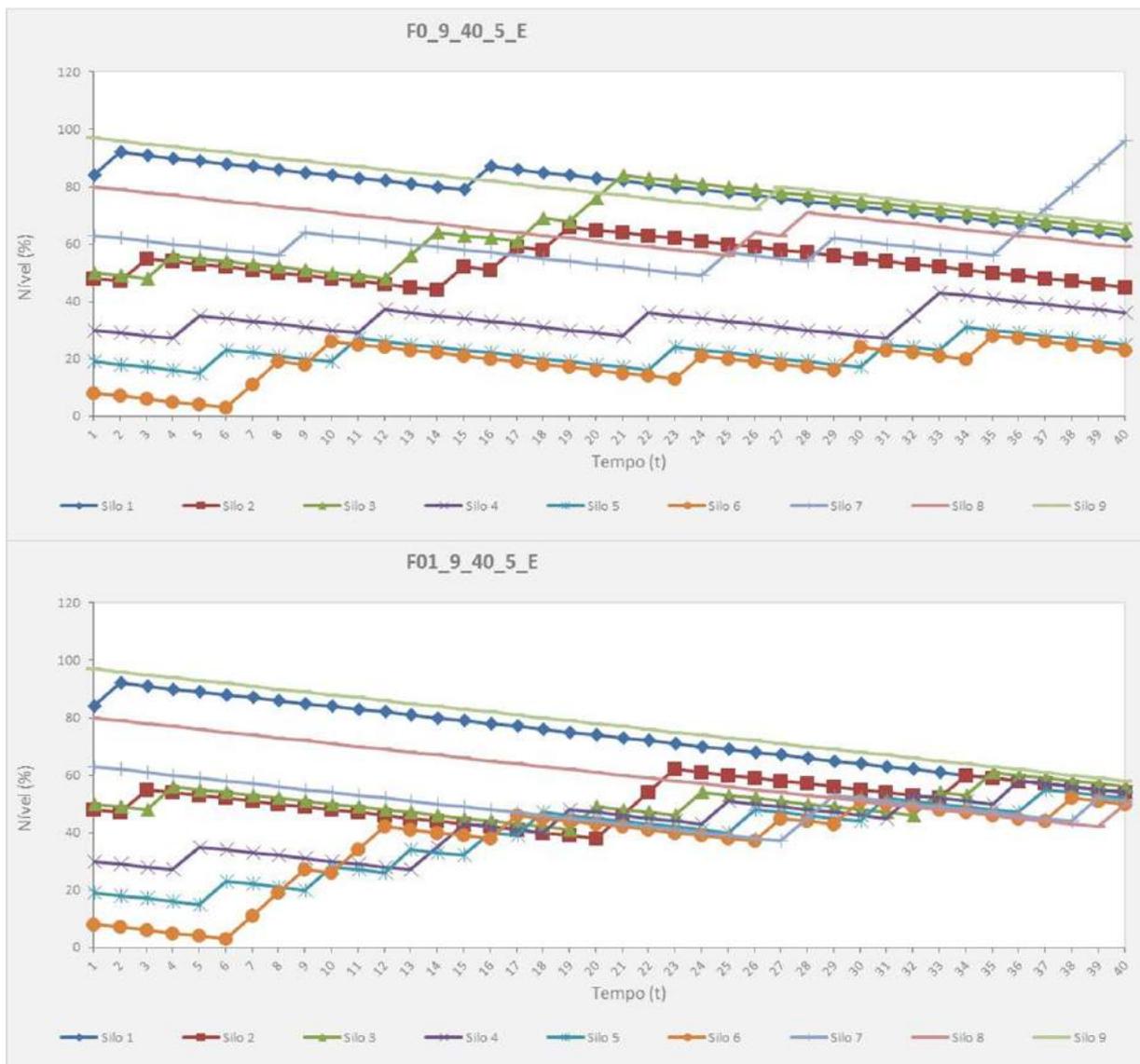
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

O aumento de dois silos no sistema manteve a variabilidade do modelo F0 dispersa, média de 60,53%, mas aumentou a média de F01 para 28,20. Nota-se que esse aumento foi em decorrência do maior tempo que o sistema levou para se estabilizar.

Assim como no sistema de quatro silos, F0 também não é considerável aceito quanto à estratégia de estabilização de (CALDAS, 2018) para esse sistema, pois seus níveis variaram entre  $18,43\% \leq L \leq 78,97\%$ .

Analisando o sistema com nove silos durante quarenta unidades de tempo, no qual F0 foi solucionado em 13 segundo e F01 em 1 hora, obteve-se a média dos níveis igual a 65,40% e 44,77% respectivamente.

Figura 7 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com nove silos



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A faixa dos níveis do sistema representado pela Figura 7 foi de  $17,25\% \leq L \leq 83,25\%$ , não se enquadrando também nos limites aceitáveis.

Por fim, a Figura 8 considera o sistema composto por dezesseis silos durante o intervalo de quarenta unidades de tempo. O tempo de processamento do modelo F0 foi 1 minuto e 53 segundos e do F01 igual a 1 hora.

Figura 8 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema equilibrado com dezesseis silos



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

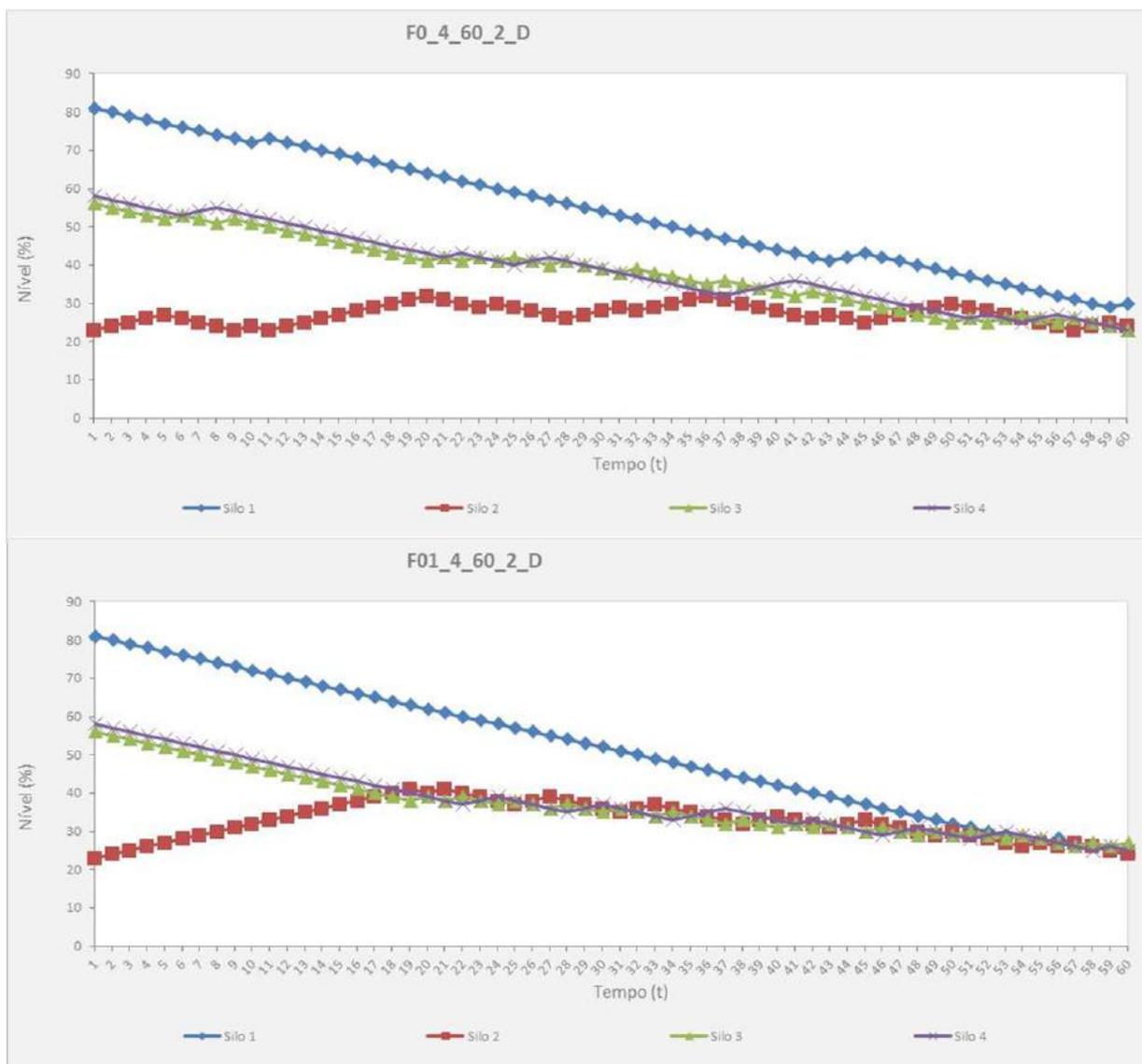
Apesar do modelo F0 ter sido mais rápido, seu desequilíbrio entre os níveis dos silos foi maior com relação aos níveis de F01, sendo a variação, em média, de 76% e 63,50% respectivamente. Nesse caso, o aumento do número de silos, fez com que os dois modelos fossem rejeitados quanto à proposta de estabilização considerada por (CALDAS, 2018). O modelo F0 não obteve nenhum dos seus limites aceitos,  $15,10\% \leq L \leq 91\%$ , já o modelo F01 obteve apenas seu limite inferior dentro da faixa aceita, sendo  $23,83\% \leq L \leq 87,33\%$ .

## 5.2.2 Instâncias desequilibradas

Serão considerados agora os mesmo sistemas para a comparação do comportamento dos modelos, porem utilizando as instâncias desequilibradas.

Para o sistema desequilibrado 4\_60\_2, Figura 9, o tempo de resolução de F0 foi igual a 6 segundo, enquanto de F01 foi de 1 hora.

Figura 9 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com quatro silos



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

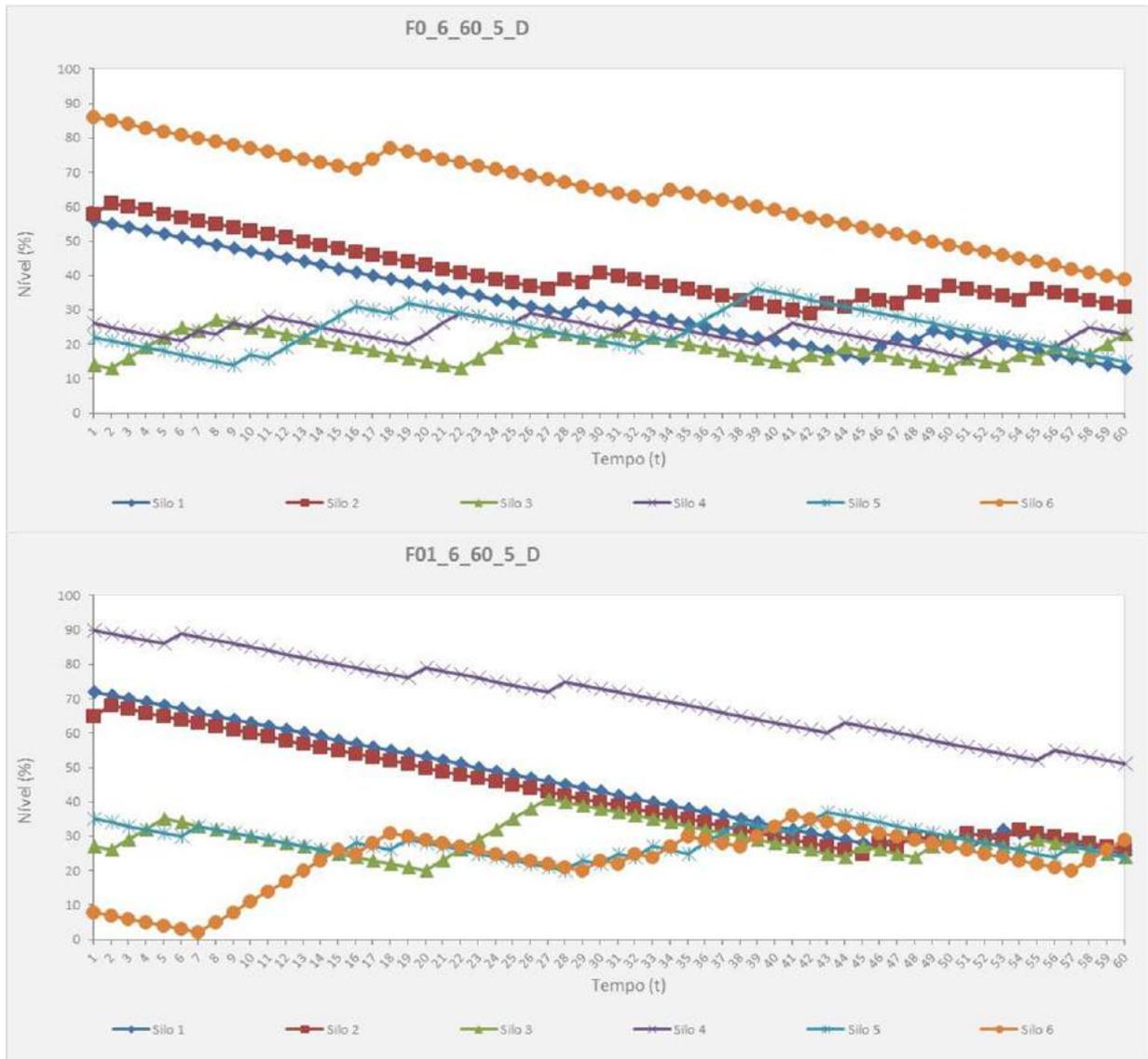
Diferentemente da instância equilibrada, a dispersão entre os níveis do silo do modelo F0 foi pequena, sendo a média igual a 27,45%. Já a média dos níveis de F01 aumentou para 20,08%.

Como a variação entre os níveis dos silos foi bem menor utilizando a instância desequilibrada, o modelo F0 manteve os níveis dentro da faixa de  $20\% \leq L \leq 80\%$ , considerada aceitável por (CALDAS, 2018), variando entre  $26,85\% \leq L \leq 54,30\%$ .

Analisando o sistema desequilibrado 6\_60\_5 em que F0 obteve um tempo de 32 segundo e F01 de 1 hora, nota-se também uma redução da média dos níveis de F0, igual a

46,90%, e um aumento na média de F01, igual a 49,83%.

Figura 10 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com seis silos

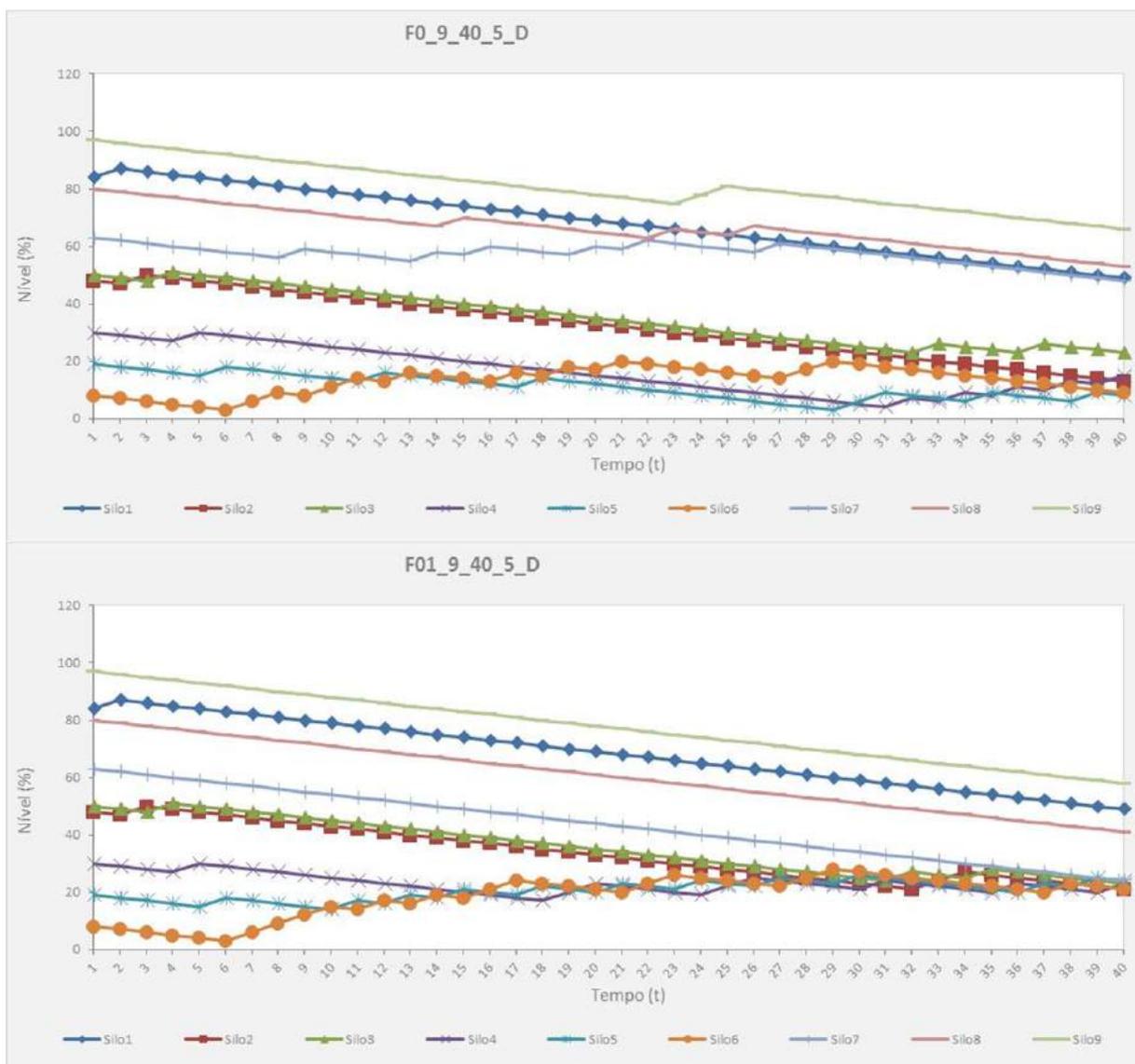


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

No caso da Figura 10, apesar da variação entre os níveis do modelo F0 ter diminuído, o mesmo não se enquadrou na faixa considerada aceitável, ficando entre  $17,20\% \leq L \leq 64,10\%$ .

Já no sistema desequilibrado 9\_40\_5, em que F0 foi processado em 12 segundo e F01 em 57 minutos e 45 segundos, os níveis de F0 não caíram como vinha acontecendo com os sistemas desequilibrados apresentados, resultando na média de 72,45%. O modelo F01 também teve seus níveis mais dispersos, na média de 60,75%.

Figura 11 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com nove silos

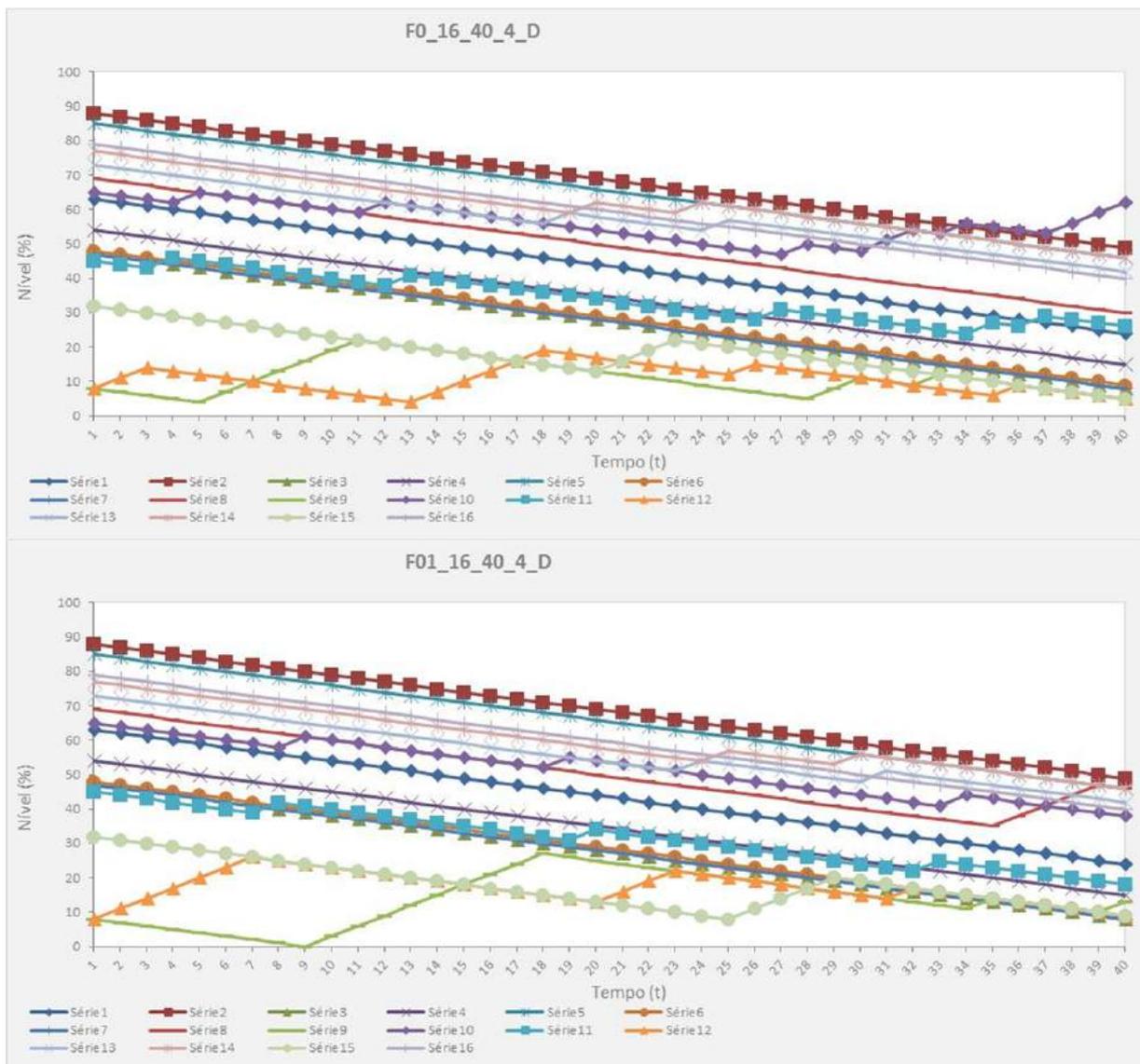


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

O desequilíbrio do sistema impactou de forma significativa não só o modelo F0 como, também, o F01. A faixa dos níveis de ambos os modelos ficaram fora do considerado aceitável para a estratégia de estabilização. A faixa de F0 ficou entre  $8,35\% \leq L \leq 80,8\%$  e de F01 entre  $16,75\% \leq L \leq 77,5\%$ .

Por fim, no sistema desequilibrado 16\_40\_4, no qual F0 teve seu tempo de processamento igual à 18 minutos e 53 segundo e F01 igual à 1 hora, os modelos tiveram uma média dos níveis muito próximas, sendo F0 igual à 60,87% e F01 igual à 58,25%.

Figura 12 – Comparações entre os níveis dos modelos F0 e F01 do sistema desequilibrado com dezesseis silos



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Por meio da Figura 12, nota-se a similaridade do comportamento do sistema quanto aos níveis dos silos e seus limites mínimos e máximos. A faixa de ambos os modelos não foi considerada aceita uma vez que seus limites mínimos ficaram abaixo do considerado. F0 variou entre  $8,4\% \leq L \leq 69,27\%$ , e F01 entre  $10,25\% \leq L \leq 68,50\%$ .

## 6 Considerações finais

O presente trabalho objetivou modelar um problema existente na área da mineração, movimentação do carro tripper, e por meio dos resultados chegarem a conclusões que podem apoiar a tomada de decisão de forma a torná-las mais assertivas.

Os resultados do problema mostram que a lógica do sistema silo-tripper pode ser vantajosa em dois quesitos: tempo de processamento e equilíbrio do processo. Ao realizar os testes com várias instâncias percebemos que a função objetivo criada, a qual retorna o menor valor dos níveis, possui tempo de processamento bem menor que a função criada por (CALDAS, 2018). Considerando a necessidade de respostas rápidas no mundo corporativo para garantir o cumprimento da produção, o modelo pode ser considerado vantajoso quanto ao seu tempo de resolução. Entretanto, se compararmos o comportamento do processo ao longo do tempo, percebemos que o modelo desenvolvido por (CALDAS, 2018) tende a se estabilizar dentro dos limites considerados aceitáveis. Nesse sentido, a estabilização do processo contribui para a não ocorrência de problemas como transbordo de níveis do silo e a falta de material nos mesmos, o que ocasionaria a interrupção da produção.

Conclui-se que os objetivos gerais e específicos do trabalho foram alcançados, visto que foram identificadas as vantagens de utilização dos modelos por meio da implementação e comparação entre duas políticas de movimentação do carro tripper em sistemas de mineração.

Como sugestão de melhoria para trabalhos futuros, sugere-se a criação de novas políticas de forma a identificar um modelo que seja, ao mesmo tempo, mais vantajoso com relação ao tempo de processamento e a estabilização do processo, assim gerando melhores resultados em menor tempo. Além disso, pode-se trabalhar com a ideia de um modelo que leve em conta a interrupção da movimentação do carro tripper após certo período de tempo para inserir as manutenções programadas do sistema, aproximando ainda mais da realidade.

# Referências

- ANDRADE, M. M. de; MARTINS, J. A. de A. *Introdução à metodologia do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação*. [S.l.]: Atlas, 2005.
- ANDRADE, P. R. de L.; SCARPIN, C. T.; STEINER, M. T. A. Programação linear binária na geração da grade horária do curso de engenharia de produção da ufpr.
- ANTAQ. *A Marinha Mercante Brasileira*. 2008. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/palestras/mai08escolaguerranaval.pdf>>. Acesso em: 13 junho 2018.
- BARBOZA, A. O. Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2005.
- BNDES. *O mercado mundial de minério de ferro e a inserção brasileira*. 2010. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7124/1/BS%2002%20O%20mercado%20mundial%20de%20min%C3%A9rio%20de%20ferro\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7124/1/BS%2002%20O%20mercado%20mundial%20de%20min%C3%A9rio%20de%20ferro_P.pdf)>. Acesso em: 13 junho 2018.
- BOYER, S. A. S. *Supervisory Control and Data Acquisition*. [S.l.], 2010. (4. ed., 4). ISBN 978-1-936007-09-7.
- CALDAS, F. N. Proposta para a solução do problema de movimentação de tripper. Instituto de Ciências Exatas e Aplicas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018.
- CAMPOS, A. L. Dimensionamento de um transportador contínuo para o transporte de minério de bauxita considerando aspectos estáticos e dinâmicos. Universidade de Brasília - UnB Faculdade UnB Gama - FGA Curso de Engenharia Automotiva, Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.brazilnet.com.br/contexts/brasilrevistas.htm>>. Acesso em: 28 nov. 2017.
- CAUCHICK, P.; MORABITO, R.; PUREZA, V. *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2011.
- CHANDA, E.; DAGDELEN, K. Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, Taylor & Francis, v. 9, n. 4, p. 203–208, 1995.
- CHAVES, A. P. *Manuseio de sólidos granulados: Coleção Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Volume 5*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. ISSN 978-85-7975-216-2. ISBN 978-85-7975-045-8.
- DATTA, D.; DEB, K.; FONSECA, C. M. Multi-objective evolutionary algorithms for resource allocation problems. In: SPRINGER. *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. [S.l.], 2007. p. 401–416.
- LOPES, F. R.; GARCIA, H. L.; NASCIMENTOS, H. Santos do; SOARES, C. A. R. Á. et al. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Revista Árvore*, SciELO Brasil, v. 28, n. 2, 2004.

- MERSCHMANN, L. Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto. *Rio De Janeiro, RJ, Brasil: Master's thesis-Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE*, 2002.
- MORAES, E. F.; ALVES, J. M. d. C. B.; SOUZA, M. J. F.; CABRAL, I. E.; MARTINS, A. X. Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina cauê da cvrd. *Rem: Revista Escola de Minas, SciELO Brasil*, v. 59, n. 3, p. 299–306, 2006.
- PINTO, L. R.; BIAJOLI, F. L.; MINE, O. M. Uso de otimizador em planilhas eletrônicas para auxílio ao planejamento de lavra. *Relatório técnico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais*, 2003.
- RICH, E.; KNIGHT, K. *Artificial intelligence*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill, 1991.
- SOUZA, G. B. d. C. et al. Otimização do posicionamento de concentradores gprs em redes elétricas inteligentes utilizando programação linear e teoria de filas. Universidade Federal de Goiás, 2014.