LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Um algoritmo heurístico para o sequenciamento de *tripper car* em usinas de minério de ferro

Lucas Andery Reis[1,2], Thomas Vargas Barsante e Pinto[4], Marcone Jamilson Freitas Souza[1,3], Luciano Perdigão Cota[1,4]

[1]Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação
Universidade Federal de Ouro Preto, CEP: 35.402-136, Ouro Preto, MG, Brasil

[2]Vale S.A.
Mina de Timbopeba, CEP: 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil

[3]Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, CEP: 35402-136, Ouro Preto, MG, Brasil

[4]Instituto Tecnológico Vale
Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, CEP: 35402-206, Ouro Preto, MG, Brasil

lucas.andery@vale.com, thomas.pinto@itv.org, marcone@ufop.edu.br, luciano.p.cota@itv.org

RESUMO

O *tripper car* é um equipamento comumente utilizado no processo de beneficiamento de minério de ferro com a função de distribuir o material em um conjunto de silos. O problema de sequenciamento de *tripper car* busca manter o nível de material nos silos o mais estável possível para que não gere instabilidade operacional nos processos subsequentes. Este trabalho contribui com a introdução de novas características operacionais ainda não tratadas na literatura. Propõe-se, neste trabalho, um algoritmo heurístico de otimização para sequenciar e resequenciar o *tripper car* durante sua operação. O resequenciamento é necessário porque há alterações no processo, como parada de equipamento e mudança na característica do material a ser alimentado, que podem ser imprevisíveis. Para a validação do algoritmo proposto foi feito um estudo de caso de uma usina e os resultados mostraram que ele foi capaz de melhorar o rendimento operacional do processo.

PALAVRAS CHAVE. *Tripper car*. Mineração. Sequenciamento. Heurística.

Tópicos: PO na Indústria. Outras aplicações em PO.

ABSTRACT

The tripper car is a machine commonly used in the iron ore beneficiation process to distribute the material in a set of silos. The tripper car scheduling problem seeks to keep the level of material in the silos as stable as possible so as not to generate operational instability in subsequent processes. This work contributes by introducing new operational characteristics that have not yet been dealt with in the literature. This work proposes a heuristic optimization algorithm for scheduling and rescheduling the tripper car during its operation. Rescheduling is necessary because there are changes in the process, such as equipment downtime and changes in the characteristics of the material to be fed, which can be unexpected. To validate the proposed algorithm, a case study of a plant was carried out, and the results showed that it improved the operational efficiency of the process.

KEYWORDS. Tripper car. Mining industry. Scheduling. Heuristic.

Paper topics: OR in Industry. Other applications in OR.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

1. Introdução

O *tripper car*, ou carro distribuidor, é um equipamento comumente utilizado em processo de beneficiamento de minério de ferro entre as fases de operação a seco, como britagem e peneiramento, com a função de distribuir o material em um conjunto de silos. Os silos são estruturas utilizadas para armazenar materiais granulados secos.

O *tripper car* é constituído por um sistema móvel e sua movimentação é feita por rodas de aço que deslizam em trilhos metálicos durante a alimentação feita por uma correia transportadora. Na Figura 1 é apresentado um fluxograma simplificado de um sistema de alimentação da operação unitária do peneiramento com o *tripper car* fazendo a função de abastecer os silos.

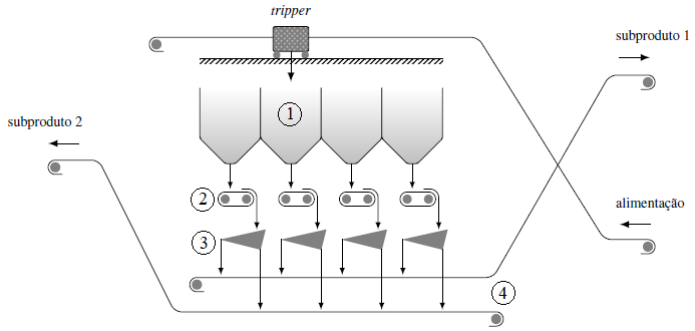


Figura 1: Diagrama simplificado de um sistema de alimentação com *tripper car* (Fonte: Adaptado de Caldas and Martins [2018]).

Na Figura 1 estão representados os principais equipamentos que compõem o sistema com *tripper car*: 1) Silos; 2) Alimentadores que ficam localizados abaixo de cada silo com o objetivo de retirar o material e alimentar o peneiramento; 3) Peneiras utilizadas para realizar a classificação do material; e 4) Correias transportadoras utilizadas para transportar o material entre os circuitos.

O problema de sequenciamento de *tripper car* tem como objetivo definir a melhor posição do equipamento sobre o silo ao longo do tempo para manter a alimentação de material em cada silo o mais estável possível para que não gere instabilidade operacional nos processos subsequentes. Este problema pode ser enquadrado como um *single machine scheduling problem*, descrito por Chang and Lee [1992]. Portanto, ele pertence à classe de problemas NP-difíceis, ou seja, ainda não existe algoritmo de tempo polinomial para resolvê-lo na otimalidade [Garey and Johnson, 1990]. Desta forma, justifica-se o desenvolvimento de algoritmos heurísticos para tratá-lo.

A literatura possui alguns trabalhos que trazem soluções para o problema de sequenciamento de *tripper car*, com aplicação de meta-heurísticas *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) e *Simulated Annealing* (SA), além de controladores baseados em regras explorando objetivos que envolvem o controle de material em nível adequado nos silos. Essas soluções podem ser encontradas em Caldas and Martins [2018]; Pedrosa [2019]; Albuquerque et al. [2019]; da Silva Filho et al. [2020] e de Morais et al. [2020], mas ainda existem lacunas na literatura a serem exploradas. Entre elas, citamos os sistemas que permitem a movimentação do *tripper car* para posições não adjacentes, nas quais há silos disponíveis ou não; neste último caso, com interrupção de alimentação.

Nesse contexto, o trabalho proposto tem como objetivo propor um algoritmo heurístico de otimização para o sequenciamento e resequenciamento do *tripper car*. O resequenciamento é necessário porque há alterações no processo, como por exemplo, parada de equipamento e mudança na característica do material a ser alimentado, que podem ser imprevisíveis. A aplicação deste estudo concentra-se na camada de otimização, conforme representação da pirâmide de controle de

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

processo de Strutzel [2014], descrita na Figura 2. Nesta camada considera-se que pré-requisitos operacionais da usina são atendidos nas camadas inferiores.

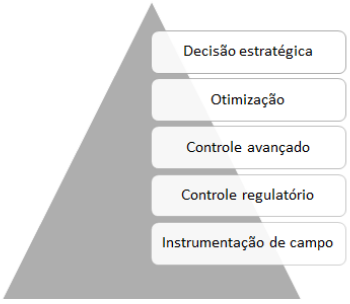


Figura 2: Representação da pirâmide de controle de processo (Adaptado de Strutzel [2014]).

O algoritmo proposto foi validado a partir de um estudo de caso com dados reais de um sistema com *tripper car* da usina de beneficiamento de Timbopeba da Vale S.A, localizada em Ouro Preto-MG.

A organização do restante deste artigo é dada como segue. A Seção 2 apresenta a revisão bibliográfica. A Seção 3 caracteriza o problema estudado, enquanto a Seção 4 apresenta o algoritmo proposto. Na Seção 5, apresentam-se os resultados da aplicação do algoritmo proposto a um estudo de caso. Por fim, a Seção 6 conclui o trabalho e apresenta as perspectivas de continuidade.

2. Revisão bibliográfica

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica de trabalhos que trataram do problema de movimentação do *tripper car*. Caldas and Martins [2018] propuseram uma formulação de programação linear inteira mista e programação dinâmica com o objetivo de maximizar o menor valor entre os níveis dos silos, buscando a máxima estabilidade na operação do *tripper car*. Porém, estas técnicas mostraram-se ineficientes para tratar instâncias de grande porte, exigindo alto tempo computacional. Como alternativa aos métodos exatos, Caldas [2018] propôs algoritmos baseados nas meta-heurísticas *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) e *Simulated Annealing* (SA). Nos experimentos, o desempenho do GRASP se mostrou muito superior aos resultados obtidos pelo SA.Pedrosa [2019] utiliza como referência a solução dada por Caldas and Martins [2018] e propõe ajustes nas restrições como forma de avaliar o desempenho entre as propostas. Também altera a função objetivo para maximizar o menor nível entre todos os períodos de tempo. Como resultado, obteve um tempo médio de execução inferior ao proposto por Caldas and Martins [2018]. Mas, em relação ao controle do nível médio, as políticas de Caldas and Martins [2018] têm melhores resultados.

da Silva Filho et al. [2020] fizeram uma comparação entre as políticas desenvolvidas por Caldas and Martins [2018] e Pedrosa [2019] e propuseram outras duas abordagens para comparar o tempo de execução e os resultados em relação ao controle de nível. A primeira política proposta é a minimização da diferença dos níveis e a segunda é a minimização das movimentações do *tripper car*. Para isso, foram realizadas as devidas alterações nas restrições do problema original. Concluiu-se que as novas políticas apresentadas são relevantes para a solução do problema de movimentação do *tripper car*, em que cada política de minimização da diferença dos níveis se mostra eficiente quando utilizada para comparação do equilíbrio dos níveis dos silos ao longo dos períodos de tempo. Já a política de minimização dos movimentos se mostra útil em relação ao tempo de execução para instâncias de menor tamanho. Albuquerque et al. [2019] desenvolveram um controlador baseado em regras com a função de controlar o nível médio de um silo com material granulado. O sistema utiliza a posição do *tripper car* e o nível de cada silo como variáveis de observação. Dessa forma,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

atua na velocidade do *tripper car* e no número de linhas operacionais. O critério utilizado busca manter o nível de cada subdivisão o mais próximo possível do nível médio.

Na Tabela 1 é apresentado um quadro comparativo entre os trabalhos citados e a nossa proposta. Foram avaliadas as seguintes características:

1. Objetivo: analisou-se se o problema tratado tem objetivos específicos relacionados a quantidade de intertravamentos por níveis baixo e alto de material no silo, passagem do *tripper car* por silos inativos e aplicação de pesos para cada objetivo específico;
2. Processo: analisou-se a utilização das seguintes características do processo: taxa de enchimento e decaimento do nível de material, tempo de enchimento de um silo pelo *tripper car* e os limites de processo;
3. Equipamento: foram analisadas as seguintes características físicas dos equipamentos silos e *tripper car*: quantidade de silos, dados de engenharia dos equipamentos, a velocidade e a distância de deslocamento do *tripper car*;
4. Método: verificou-se o método de solução utilizado para tratar o problema: exato, heurístico ou controle especialista.

Tabela 1: Comparativo entre trabalhos da literatura.

Trabalhos	(1) Objetivo				(2) Processo				(3) Equipamento				(4) Método		
	Nível Baixo	Nível Alto	Silos Inativos	Pesos Individuais	Taxa de Enchimento	Taxa de Decaimento	Tempo de Enchimento	Limites de Processo	Quantidade de Silos	Dados de Engenharia	Velocidade do *tripper car*	Deslocamento	Heurístico	Exato	Controle especialista
Caldas and Martins [2018]						✓		✓	✓					✓	
Caldas [2018]						✓		✓	✓				✓	✓	
Pedrosa [2019]						✓		✓	✓					✓	
Albuquerque et al. [2019]								✓	✓		✓	✓			✓
da Silva Filho et al. [2020]						✓		✓	✓					✓	
de Morais et al. [2020]						✓		✓	✓					✓	
Nossa proposta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

3. Caracterização do problema

O problema de movimentação do *tripper car*, aqui denominado TCSP (das iniciais do termo em inglês *tripper car scheduling problem*), envolve um conjunto $J = \{1,2,\cdots,|J|\}$ de silos, um horizonte de planejamento $I = \{0,1,...,|I|\}$, e uma matriz $X = (x_{ij})_{|I|\times|J|}$ de variáveis binárias x_{ij}, que assume o valor 1 se o *tripper car* está posicionado no silo j no instante i. Assume-se que o *tripper car* está posicionado em algum silo $j = j_0$ no instante inicial, isto é, $x_{0j_0} = 1$ para algum silo $j_0 \in J$. Na parte inferior de cada silo existe um alimentador, que opera com velocidade variável em função de um *setpoint* (SP) definido pelo processo subsequente.

Neste problema busca-se definir o próximo posicionamento, $x_{ij}, i \in I\setminus\{0\}, j \in J\setminus\{j_0\}$, do *tripper car* que melhor distribua o material no conjunto de silos. A seguir, são apresentadas as características das movimentações:

- Movimento de realocação para posição adjacente: dada uma posição j, o *tripper car* pode se movimentar para uma posição $j+1$ ou $j-1$, desde que j não seja um silo das extremidades,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

isto é, $1 < j < |J|$. No caso de ele ser uma extremidade, apenas um único movimento é permitido.

- Movimento de realocação para posição não adjacente: dada uma posição j, o *tripper car* pode se movimentar para uma posição $j + z$ ou $j - z$, com $1 < z \leq |J| - 1$. Para realizar o movimento, o *tripper car* precisa passar por $z - 1$ posições intermediárias de uma das seguintes maneiras:
  1. Sem interrupção de alimentação: caso os silos intermediários estejam ativos, a alimentação é mantida enquanto o *tripper car* passa pelos silos.
  2. Com interrupção de alimentação: caso exista pelo menos um silo intermediário inativo, o *tripper car* precisa interromper a alimentação quando passar por cada um deles. Portanto, nesta situação a alimentação do circuito é interrompida.

A Figura 3 apresenta um exemplo de um *tripper car* com seis silos. Os silos 1, 2, 3 e 5 estão ativos e os demais inativos, estes últimos identificados na cor vermelha.

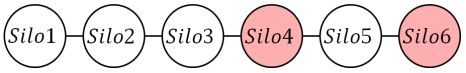


Figura 3: *Tripper car* com seis silos.

A Figura 4 ilustra uma solução de movimentações desse *tripper car* em um horizonte de planejamento de $|I| = 7$ instantes de tempo. A posição do *tripper car* em cada instante está destacada na cor verde.

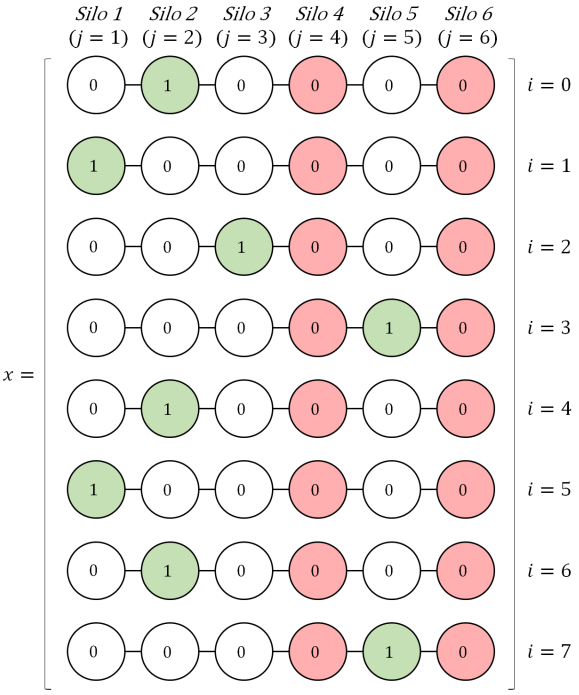


Figura 4: Movimentações do *tripper car* em um horizonte de planejamento $I = 7$.

No instante inicial, $i = 0$, o *tripper car* está posicionado no silo $j = 2$, portanto, tem-se $x_{02} = 1$. No instante $i = 1$, realiza-se um movimento para o silo adjacente $j = 1$ ($x_{11} = 1$). No instante $i = 2$, o *tripper car* movimenta-se para o silo não adjacente $j = 3$ ($x_{23} = 1$). Durante este movimento, o *tripper car* passa pelo silo $j = 2$ sem interromper a alimentação, uma vez que ele

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

está ativo. No instante $i = 3$, realiza-se um movimento para o silo não adjacente $j = 5$ ($x_{35} = 1$). Durante este movimento, o *tripper car* passa pelo silo $j = 4$, com interrupção da alimentação, uma vez que ele está inativo. No instante $i = 4$, é realizada uma movimentação não adjacente para o silo $j = 2$ ($x_{42} = 1$). Para essa movimentação, o *tripper car* passa pelo silo $j = 4$ com interrupção da alimentação e pelo silo $j = 3$ sem interrupção. No instante $i = 5$, realiza-se um movimento para o silo adjacente $j = 1$ ($x_{51} = 1$). No instante $i = 6$, realiza-se um movimento para o silo adjacente $j = 2$ ($x_{62} = 1$). Por fim, ao final do horizonte de planejamento, no instante $i = 7$, realiza-se um movimento para o silo não adjacente $j = 5$ ($x_{75} = 1$). Durante este movimento, o *tripper car* passa pelo silo $j = 3$, sem interrupção da alimentação, e pelo silo $j = 4$, com interrupção da alimentação, uma vez que ele está inativo.

O objetivo neste problema é definir o planejamento do posicionamento do *tripper car* nos silos (J) no horizonte de planejamento (I) buscando minimizar a função objetivo f definida pela Eq. (1).

$$\min \quad f(u, o, r) = \alpha \left(\sum_{i \in I} u_i \right) + \omega \left(\sum_{i \in I} o_i \right) + \sigma \left(\sum_{i \in I} r_i \right) \tag{1}$$

onde α, ω e σ são os pesos aplicados em cada parcela da função objetivo, respectivamente. Na primeira parcela, u_i indica o número de intertravamentos ocorridos no instante i por nível baixo. Na segunda parcela, o_i indica o número de intertravamentos por nível alto. Por fim, na terceira parcela, r_i indica o número de silos inativos visitados pelo *tripper car* no instante i.

A seguir, são apresentadas as restrições do problema. Na Eq. (2) define-se que o *tripper car* deve estar em uma única posição em cada instante de tempo.

$$\sum_{j=1}^{J} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in I \setminus \{0\} \tag{2}$$

A distância entre cada par de silos j e k é calculada pela Eq. (3):

$$\lambda_{jk} = |c_j - c_k| \quad \forall j, k \in J, j \neq k \tag{3}$$

em que, c_j e c_k são o centro dos silos j e k, respectivamente, λ_{jk} é a distância, em metros, entre os silos j e k. Baseado na distância entre dois silos j e k, é possível calcular o tempo de deslocamento (ou tempo de preparação) do *tripper car* entre dois silos j e k, dado pela Eq. (4):

$$S_{jk} = \frac{\lambda_{jk}}{v} \quad \forall j, k \in J, j \neq k \tag{4}$$

em que v é a velocidade de deslocamento do *tripper car* e S_{jk} é o tempo de deslocamento entre os silos j e k, em segundos.

Consequentemente, com estas informações, é possível calcular o nível de cada silo j no instante i partindo-se de um silo origem j' para alcançar o silo destino $j^\star$. Há quatro casos a analisar:

Primeiro Caso: Cálculo do nível do silo destino $j^\star$ no instante i. Neste caso, o nível $l_{ij^\star}$ do silo destino no instante i é determinado pela soma de seu nível no instante anterior ($l_{[i-1]j^\star}$) com a sua parcela de enchimento (dada pelo produto da sua taxa de enchimento ($e_{j^\star}$) pelo tempo de permanência no silo $j^\star$), subtraída da sua parcela de decaimento (dada pelo produto da sua taxa de decaimento ($d_{j^\star}$) pelo tempo de deslocamento até alcançar o silo destino $j^\star$).

Segundo Caso: Cálculo do nível do silo origem j' no instante i. Neste caso, o nível $l_{ij'}$ do silo origem j' no instante i é determinado pela soma do seu nível no instante anterior ($l_{[i-1]j'}$) com

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

a sua parcela de enchimento (dada pelo produto da sua taxa de enchimento $e_{j'}$ pelo tempo de deslocamento para sair desse silo), subtraído da sua parcela de decaimento (dada pelo produto da sua taxa de decaimento ($d_{j'}$) pela soma do tempo de deslocamento até alcançar o silo destino $j^\star$ com o tempo de enchimento do silo destino $j^\star$).

Terceiro Caso: Cálculo do nível de um silo j_1 intermediário entre os silos origem j' e destino $j^\star$ no instante i. Neste caso, o nível l_{ij_1} do silo intermediário j_1 no instante i é determinado pela soma do seu nível no instante anterior ($l_{[i-1]j_1}$) com a sua parcela de enchimento (dada pelo produto da sua taxa de enchimento e_{j_1} pelo tempo de passagem por esse silo intermediário), subtraído pela sua parcela de decaimento (dada pelo produto da sua taxa de decaimento (d_{j_1}) pela soma do tempo de deslocamento até alcançar o silo destino $j^\star$ com o tempo de enchimento do silo destino $j^\star$).

Quarto Caso: Cálculo do nível de um silo j_2 que não está no percurso do *tripper car* no instante i. Neste caso, o nível l_{ij_2} do silo j_2 que não está no percurso do *tripper car* no instante i é determinado pela subtração do seu nível no instante anterior ($l_{[i-1]j_2}$) pela sua parcela de decaimento (dada pelo produto da sua taxa de decaimento (d_{j_2}) pela soma do tempo de deslocamento até alcançar o silo destino $j^\star$ com o tempo de enchimento do silo destino $j^\star$).

Com o resultado do cálculo de nível dos silos no instante i, pode-se calcular o número de intertravamentos por nível baixo u_i e o número de intertravamentos por nível alto o_i, ambos no instante i, conforme Eqs. (5) e (6):

$$u_i = \sum_{j=1}^{J} y_{ij}, \forall i \in I \setminus \{0\} \quad y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } l_{ij} \leq \gamma \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{5}$$

$$o_i = \sum_{j=1}^{J} z_{ij}, \forall i \in I \setminus \{0\} \quad z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } l_{ij} \geq \beta \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{6}$$

em que γ é o limite inferior de nível de cada silo, β é o limite superior de nível de cada silo, l_{ij} é o nível do silo j no instante i, y_{ij} e z_{ij} indicam se o silo j atinge o limite inferior ou superior, respectivamente, no instante i.

A seguir, é apresentado na Eq. (7), o cálculo do número de silos inativos que estejam no percurso do *tripper car*. Neste caso, é necessária a interrupção de alimentação durante a passagem do *tripper car* por cada um desses silos.

$$r_i = \sum_{j=1}^{J} q_{ij}, \forall i \in I \setminus \{0\} \quad q_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o silo } j \text{ está no percurso e está inativo no instante } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{7}$$

em que q_{ij} indica se o silo j está no percurso do *tripper car* e está inativo no instante i e r_i é o número de silos inativos que estão no percurso do *tripper car* no instante i.

4. Algoritmo proposto

Nesta seção é proposto um algoritmo para tratar o problema endereçado neste estudo. Esta seção está organizada como segue. Na Seção 4.1 mostra-se como representar e avaliar uma solução. Na Seção 4.2 apresenta-se o algoritmo de otimização proposto para tratar o TCSP.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

4.1. Representação e avaliação da solução

Uma solução x é representada por uma matriz $x = (x_{ij})_{|I|\times|J|}$ de variáveis binárias x_{ij}, onde J é o conjunto de silos e I é o horizonte de planejamento. A posição de uma célula x_{ij} da matriz assume o valor 1 se o *tripper car* é posicionado no silo j no instante i. A Tabela 2 apresenta uma solução para um problema fictício em um horizonte de planejamento com $|I| = 5$ e com $|J| = 6$ silos. Por exemplo, observe que no instante $i = 1$ o *tripper car* desloca-se para o silo $j = 6$.

Tabela 2: Exemplo de uma solução do *tripper car* em uma instância com 5 instantes de tempo e 6 silos.

Instante (i) (i)	**Silo 1** (j=1)	**Silo 2** (j=2)	**Silo 3** (j=3)	**Silo 4** (j=4)	**Silo 5** (j=5)	**Silo 6** (j=6)
0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0

Uma solução x é avaliada utilizando-se a função definida pela Eq. (1), considerando a quantidade de silos com nível alto, a quantidade de silos com nível baixo e a quantidade de silos inativos que estão no percurso do *tripper car*.

4.2. Algoritmo de otimização

Esta seção apresenta o algoritmo proposto para tratar o TCSP. Ele é responsável por sequenciar o *tripper car* em todos os instantes do horizonte de planejamento a partir da posição em que o *tripper car* está localizado. Dada a natureza dinâmica da operação da usina, uma vez que há variabilidade da taxa de alimentação e paradas de equipamento, é necessário realizar o resequenciamento a cada reposicionamento do *tripper car* ou caso um tempo limite de execução seja atingido.

O Algoritmo 1 mostra como é construída uma solução para o sequenciamento do *tripper car*. Na linha 1, a matriz solução x é inicializada. Na linha 2, o *tripper car* é fixado no silo j_0 no instante $i = 0$. Na linha 3, inicia-se um laço de repetição para o sequenciamento em cada instante do horizonte de planejamento. Na linha 4 inicia-se um novo laço de repetição que irá avaliar cada silo candidato j a ser o destino do *tripper car*. Na linha 5 é verificado se o silo que está sendo avaliado está ativo. Em caso verdadeiro, na linha 6 inicia-se um laço que calcula o nível futuro para todos os silos, de acordo com os quatro casos definidos na Seção 3 somente para o instante considerado. Com os níveis futuros calculados na linha 7, na linha 8 é realizado o cálculo da quantidade total de silos inativos visitados pelo *tripper car* durante o deslocamento, de acordo com a Eq. (7). Na linha 9 calcula-se a quantidade de intertravamentos por nível alto, de acordo com a Eq. (6). Na linha 10 calcula-se a quantidade total de intertravamentos por nível baixo, de acordo com a Eq. (5). Então, na linha 11, é calculado o valor da função guia para o silo candidato j, de acordo com a Eq. (8):

$$g_j(u, o, r) = \alpha \times u + \omega \times o + \sigma \times r, \tag{8}$$

nos quais α, ω e σ são os pesos aplicados em cada parcela da função, respectivamente. As variáveis u, o e r representam o total de silos com nível baixo, com nível alto e inativos, respectivamente, somente para o instante considerado. Esses silos inativos são aqueles nos quais estão no percurso do *tripper car* e há interrupção de alimentação.

Em caso negativo, na linha 13, o valor da função guia para este silo é fixado com um custo suficientemente elevado. Na linha 14 verifica-se qual foi o menor valor encontrado na função guia. Na linha 15 seleciona-se o silo j associado ao menor valor dessa função. Na linha 16 a

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

matriz solução é atualizada com o silo candidato vencedor. Por fim, na linha 17, os níveis que são utilizados no próximo passo da construção do sequenciamento são atualizados com os níveis futuros calculados considerando o silo j escolhido. Ao final da execução do horizonte de planejamento, na linha 18, é retornada a matriz solução com um novo sequenciamento.

Algoritmo 1: Algoritmo de otimização

Entrada: Comprimento da base superior de cada silo (b), nível inicial de cada silo (l_{0j}), status de cada silo (q), tempo de enchimento de cada silo pelo *tripper car* (p), taxa de enchimento do nível de material de cada silo (e), taxa de decaimento do nível de material de cada silo (d), velocidade do *tripper car* (v), limite mínimo para o nível de material em cada silo (γ), limite máximo para o nível de material em cada silo (β), horizonte de planejamento (I), posição inicial do *tripper car* (j_0), conj. de silos (J), função guia $g(.)$

Saída : Solução x para o TCSP, nível de cada silo em cada instante (l)

1 $x \leftarrow 0$
2 $x_{0j_0} \leftarrow 1$
3 **for** *cada instante* $i \in I \setminus \{0\}$ **do**
4 **for** *cada silo* $j \in J \setminus \{0\}$ **do**
5 **if** $q_j == 1$ **then**
6 **for** *cada silo* $k \in J$ **do**
7 $l_{ik} \leftarrow$ CalculeNivelFuturo($b_k, l_{[i-1]k}, p_j, e_k, d_k, v, j_0$)
8 $r \leftarrow$ CalculeQtdeSiloInativo(q)
9 $o \leftarrow$ CalculeQtdeIntNivelAlto(β, l)
10 $u \leftarrow$ CalculeQtdeIntNivelBaixo(γ, l)
11 $g_j \leftarrow \alpha \times u + \omega \times o + \sigma \times r$
12 **else**
13 $g_j \leftarrow \infty$
14 $g_{\min} = \min\{g_j \mid j \in J\}$
15 Seja $j_{\min}$ o silo $j \in J$ associado a $g_{\min}$
16 $x_{ij_{\min}} \leftarrow 1$
17 Atualize l com os níveis futuros
18 **Retorna** x

5. Experimentos computacionais

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação do algoritmo proposto a um estudo de caso da usina de Timbopeba da Vale S.A., localizada em Ouro Preto-MG. O algoritmo foi desenvolvido na linguagem Python, utilizando o *Spyder IDE* e o *Google Colaboratory*. Os experimentos computacionais foram executados em um computador com processador Intel Core i7-8700, memória RAM de 8 Gb e sistema operacional Windows 11. O restante desta seção está como segue. Na Seção 5.1 são descritas as instâncias do estudo de caso e os parâmetros de entrada do algoritmo. Na Seção 5.2 são apresentados os resultados dos experimentos.

5.1. Instâncias do estudo de caso

As instâncias do estudo de caso foram coletadas a partir do sistema PIMS (iniciais do termo em inglês *Plant Information Management Systems*) da usina de Timbopeba, por meio do *software* PI *System*, fornecido pela AVEVA. Os dados físicos são provenientes da documentação de engenharia da usina. Os parâmetros do processo e suas descrições são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do processo e suas descrições.

Parâmetro	Descrição	Valor
b	Comprimento da base superior de cada silo	$7m$
p	Tempo de enchimento de um silo pelo *tripper car*	$30s$
v	Velocidade do *tripper car*	$0{,}24m/s$
γ	Limite mínimo para o nível de material para cada silo	5%
β	Limite máximo para o nível de material para cada silo	75%
I	Horizonte de planejamento	10
J	Conjunto de silos	6

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

A Figura 5 ilustra o diagrama do processo deste estudo de caso.

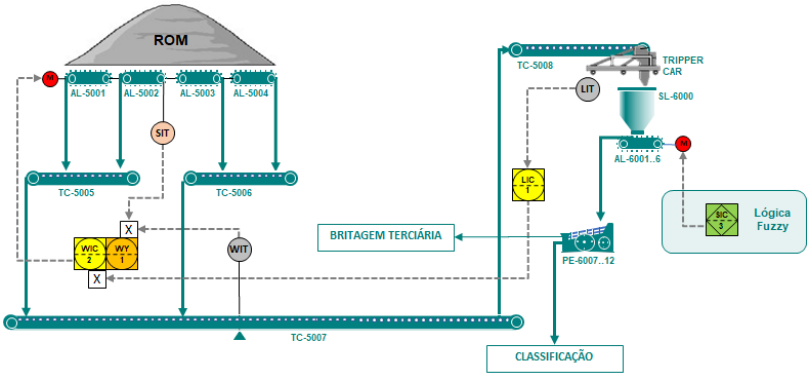


Figura 5: Processo de alimentação com *tripper car*.

O controle de nível médio dos silos, representado na Figura 5 pela malha LIC-1, faz parte de uma estratégia em cascata com a malha de controle de taxa de alimentação, representado pela malha WIC-2. Esse controle trabalha em paralelo com a lógica de movimentação do *tripper car* e influencia a taxa de enchimento (e) dos silos. A etapa subsequente ao armazenamento de material nos silos é o peneiramento. Nessa etapa, as peneiras recebem material dos alimentadores que estão posicionados na parte inferior dos silos. Os alimentadores são manipulados por um controlador *Fuzzy*, que tem como variáveis de observação a vazão de alimentação das etapas subsequentes como a deslamagem e a estocagem. Esse controle trabalha em paralelo com a lógica de movimentação do *tripper car* e influencia a taxa de decaimento (d) dos silos.

Como o objetivo é avaliar o algoritmo de movimentação do *tripper car*, os controles supracitados não fazem parte do experimento. Por isso, para a avaliação são considerados valores fixos para as taxas de enchimento e decaimento do nível, no caso, $e = 0{,}80\%/s$ e $d = 0{,}15\%/s$. Os pesos utilizados na função guia $g(.)$, descrita na Eq. (8), foram: $\alpha = 0{,}3$, $\omega = 0{,}5$ e $\sigma = 0{,}2$. O cenário avaliado refere-se à operação do *tripper car* com a linha 3 do peneiramento com o *status* inativo, isto é, $status = \{1, 1, 0, 1, 1, 1\}$. Desta forma, o *tripper car* terá a necessidade de realizar movimentações com interrupção de alimentação quando precisar passar pelo silo da linha 3. Os níveis iniciais considerados foram $n = \{30, 50, 30, 40, 50, 60\}$, sendo que a posição inicial do *tripper car* foi o silo 2, isto é, $j_0 = 2$.

5.2. Resultados

A Figura 6 apresenta o comportamento dos níveis dos silos ao longo do tempo, que representa 60 minutos de operação da usina. Cada planejamento das movimentações foi realizado em $9ms$ pelo algoritmo. Observa-se que não ocorreu nenhum evento em que o nível de material dos silos ficou abaixo do limite inferior (5%) e acima do limite superior (75%). Já na comparação com a operação real do dia utilizado como referência neste cenário, ocorreram 7 desarmes por nível baixo por hora. Esse resultado mostra que o algoritmo de otimização proposto conseguiu resolver o problema de posicionamento do *tripper car* aumentando o rendimento operacional do processo.

Na Figura 7 é apresentada a variação do nível médio dos silos ativos durante a execução deste experimento. Verifica-se que há uma estabilidade no nível médio dos silos ativos durante o processo, que ficou mantido a uma média de 48,73%. Este resultado também certifica que o planejamento de movimentação do *tripper car*, gerado pelo algoritmo desenvolvido, mantém uma distribuição equilibrada entre os silos. Essa distribuição se mantém mesmo com a existência de movimentos do *tripper car* com interrupção de alimentação durante a passagem pelo silo inativo, os quais totalizaram 15 eventos ao longo do experimento. Esse resultado mostra que o algoritmo

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

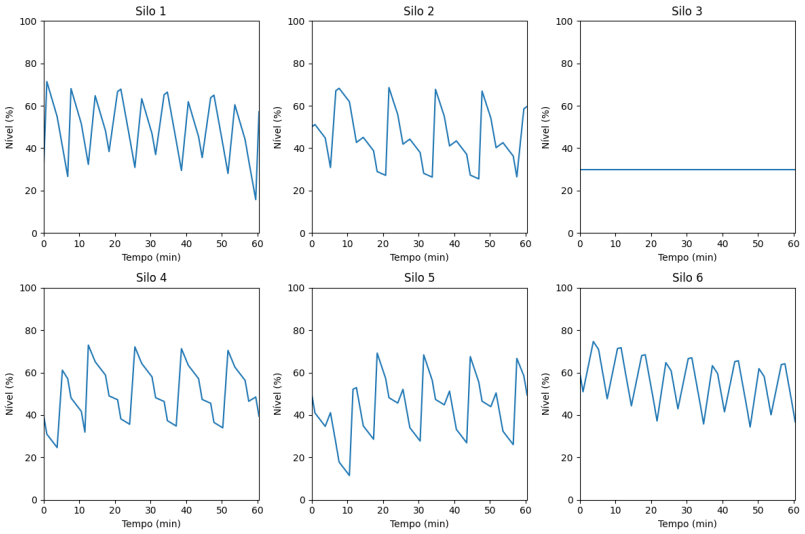


Figura 6: Variação dos níveis dos silos.

proposto contribuiu para a estabilidade do controle regulatório da alimentação, que tem o nível médio dos silos como uma das variáveis de processo.

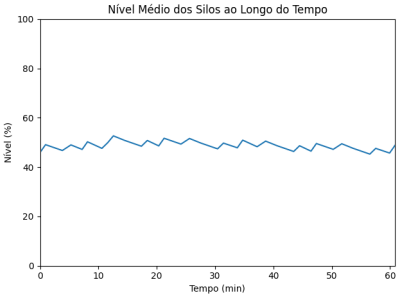


Figura 7: Nível médio dos silos ativos.

6. Conclusões e perspectivas para trabalhos futuros

Este trabalho tratou o problema de sequenciamento de *tripper car* em uma indústria mineradora de ferro. Este problema leva em consideração características ainda não tratadas na literatura, como a movimentação do *tripper car* para posições não adjacentes com a interrupção de sua alimentação ao passar por silos inativos. O objetivo é minimizar os alarmes de níveis baixo e alto que geram intertravamentos nos equipamentos de alimentação da usina, e o número de vezes que o equipamento passa por silos inativos. Para resolvê-lo, foi desenvolvido um algoritmo heurístico de otimização para uma tomada de decisão instantânea. Para validá-lo, foi feito um estudo de caso em uma indústria de minério de ferro. Os resultados obtidos pelo algoritmo foram comparados com aqueles da operação real da indústria. Ao minimizar os alarmes de níveis baixo e alto de material nos silos e o número de eventos de passagem por silos inativos, foi mostrado que o rendimento operacional do processo aumentou e manteve-se estável durante o horizonte de planejamento. Esses resultados mostram que o algoritmo proposto pode ser aplicado na operação real da indústria. Como perspectiva para trabalhos futuros pretende-se explorar incertezas nos dados de entrada, como a variabilidade na taxa de alimentação.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, CNPq (processos 311074/2023-5 e 302629/2023-8), FAPEMIG (processo CEX-PPM-676-17), Instituto Tecnológico Vale (ITV), Vale S.A. e Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Referências

Albuquerque, K., Silva, H., Teodoro, E., Fonseca, A., Garioli, G., Lopes, Ê., Cota, L., and Euzébio, T. (2019). Averaging level control of bulk solid material using a tripper car. In *18th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing – MMM 2019*, volume 52, p. 147–152, Stellenbosch, South Africa. IFAC, Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.179.

Caldas, F. N. (2018). Propostas para solução do problema de movimentação de tripper. Dissertação de mestrado (ciência da computação), Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG. https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11028.

Caldas, F. N. and Martins, A. X. (2018). Proposed solutions to the tripper car positioning problem. In *20th International Conference on Enterprise Information Systems – ICEIS 2018*, p. 344–352, Funchal, Portugal. INSTICC, SciTePress. https://doi.org/10.5220/0006806303440352.

Chang, P.-C. and Lee, H.-C. (1992). A two-phase approach for single machine scheduling problems: Minimizing the total absolute deviation. In *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, volume 15 of *6*, p. 735–742. Taylor & Francis. https://doi.org/10.1080/02533839.1992.9677469.

da Silva Filho, E. S., Tavares, W. F., Martins, A. X., Costa, T. A., and Silva, T. A. d. O. (2020). Problema de movimentação do carro tripper-análise, desenvolvimento e comparação de políticas. In *52th Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – SPBO 2020*, João Pessoa, PB. Galoá. https://doi.org/10.59254/sbpo-2020-122527.

de Morais, B. S., Santos, M. C. S., Silva, T., Martins, A. X., and de Souza, M. C. (2020). Uma abordagem dinâmica para o problema de movimentação do carro tripper. In *52th Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – SPBO 2020*, João Pessoa, PB. Galoá. https://doi.org/10.59254/sbpo-2020-122547.

Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1990). *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., USA. ISBN 0716710455. https://dl.acm.org/doi/10.5555/574848.

Pedrosa, L. d. O. M. (2019). Problema de movimentação do carro tripper - comparação de novas políticas. Trabalho de conclusão de curso (engenharia de produção), Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, João Monlevade, MG. https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1913.

Strutzel, F. A. M. (2014). Controle ihmpc para uma planta de hidrotratamento de diesel. Dissertação de mestrado (engenharia química), Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP. https://doi.org/10.11606/D.3.2014.tde-24062014-102335.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193669
https://proceedings.science/p/193669?lang=pt-br