

OTIMIZAÇÃO DA REPOSIÇÃO DE CORPOS MOEDORES EM MOINHOS DE BOLAS

**Daniel Luiz de Souza^{1,2}, Mario Sérgio dos Santos², Cássio Pascoal Costa²,
Marcone Jamilson Freitas Souza^{1,3,4}, Luciano Perdigão Cota^{1,4}**

¹Progr. de Pós-graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração
Instituto Tecnológico Vale e Universidade Federal de Ouro Preto, CEP: 35.400-000, Ouro Preto,
MG, Brasil

²Vale S.A.

Mina Cauê, Serra do Esmeril, CEP: 35900-900, Itabira, MG, Brasil

³Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, CEP: 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil

⁴Instituto Tecnológico Vale

Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, CEP: 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil

{daniel.luiz.souza, mario.sergio.santos, cassio.costa}@vale.com,
marcone@ufop.edu.br, luciano.p.cota@itv.org

RESUMO

O desempenho de um moinho de bolas é influenciado pelo seu grau de enchimento, que é o volume ocupado pelas bolas em relação ao volume do moinho. Manter o grau de enchimento dentro dos valores operacionais é crucial para obter uma boa eficiência energética na fragmentação do minério de ferro. Este estudo apresenta modelos matemáticos que correlacionam o grau de enchimento e a potência do motor de um moinho de bolas, bem como um algoritmo de otimização para planejar a reposição de corpos moedores. O objetivo é maximizar a potência do moinho, decidindo estrategicamente a rota de reposição, o momento e o quantitativo de corpos moedores que devem ser adicionados a cada moinho. Testado em dois cenários reais de produção de uma usina de beneficiamento de minério de ferro, o algoritmo proposto forneceu soluções melhores do que as geradas pelos tomadores de decisão da empresa.

PALAVRAS CHAVE. Moinho de Bolas, Corpos Moedores, Otimização, Heurística.

Tópicos: POI - PO na Indústria, OA - Outras aplicações em PO.

ABSTRACT

The performance of a ball mill is influenced by its filling degree, which is the volume occupied by the balls in relation to the mill volume. Maintaining the filling degree within operational values is crucial to achieving good energy efficiency in iron ore fragmentation. This study presents mathematical models that correlate the filling degree and the motor power of a ball mill, as well as an optimization algorithm to plan the replacement of grinding Media. The objective is to maximize the mill power by strategically deciding the replacement route, timing, and quantity of grinding media to be added to each mill. Tested in two real production scenarios at an iron ore beneficiation plant, the proposed algorithm provided better solutions than those generated by the company's decision-makers.

KEYWORDS. Ball Mill. Grinding Media. Optimization, Heuristic.

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

1. Introdução

A fragmentação é um estágio crucial em muitos circuitos de tratamento de minerais, com três objetivos principais: atender às exigências de tamanho das partículas para processos posteriores, aumentar a área superficial das partículas e obter um tamanho de partícula adequado para comercialização imediata. O custo de operação e o investimento de capital em circuitos de cominuição e moagem são influenciados pela energia necessária para fragmentar o material e pelo esforço mecânico envolvido no processo [Delboni Junior et al., 2010]. Devido ao alto consumo de energia e aos altos custos associados aos processos de moagem, recentes pesquisas têm buscado novas maneiras de reduzir o consumo de energia por tonelada de minério [Rezaeizadeh et al., 2022]. Luz et al. [2010] afirmam que a maior parte dos custos de tratamento de minério está relacionada a esse processo, e, portanto, otimizá-lo é uma preocupação constante para as empresas.

Atualmente, o uso de moinhos autógenos (AG), semi-autógenos (SAG) e de bolas tem sido a preferência para essa redução [Rezaeizadeh et al., 2022]. O desempenho de um moinho é influenciado por diversos fatores, dentre eles encontram-se o grau de enchimento que controla o desempenho do moinho, o consumo de energia específico e o tamanho das partículas do produto final [Donkor, 2014]. Opazo et al. [2022] destacam que, ao considerar como a energia é consumida no moinho rotativo, deve-se adotar a operação desse equipamento com valores ótimos de enchimento e velocidade crítica, pois isso determina sua capacidade máxima de produção. Portanto, diferentes métodos têm sido investigados para obter informações sobre o grau de enchimento do moinho em tempo real.

No estudo de Keshav et al. [2011], é apresentado o “Sensomag”, um sensor utilizado para monitorar o grau de enchimento de um moinho, com o objetivo de otimizar seu desempenho. O sensor é instalado dentro do moinho e detecta o ângulo da “zona de impacto” e o ângulo da “zona de desprendimento”, que são usados para determinar a quantidade de corpos moedores e de polpa dentro do moinho, respectivamente. Os resultados mostraram que o grau de enchimento e o nível de sólidos calculados pelo sensor estavam próximos do objetivo, com um erro máximo de 2%, o que indica uma boa correlação entre as medições. Com base nesses resultados, os autores sugerem que o sensor pode ser utilizado para auxiliar na reposição dos corpos moedores.

Opazo et al. [2022] desenvolveram um sistema para controlar um moinho semi-autógeno em tempo real, que faz uso de uma unidade de sensoriamento de vibração com acelerômetros e microfones para medir as vibrações e sons gerados pela carga durante o processo. Além disso, o sistema utiliza um processador de sinal para construir as informações e um sistema de controle para obter informações operacionais do moinho, como taxa de alimentação, fluxo de água, velocidade do moinho, entre outros. O sistema é capaz de calcular a potência instantânea consumida pelo moinho e prever os valores de enchimento de corpos moedores e polpa no interior do moinho.

Gontijo et al. [2017] implementaram um sistema de reposição automática de corpos moedores no complexo Minas-Rio de extração, beneficiamento e transporte de minério de ferro, com base na relação entre o grau de enchimento e a potência do moinho. O sistema foi implantado em quatro etapas, sendo que na primeira etapa a reposição foi realizada com a ajuda de um operador, enquanto na segunda etapa, a reposição foi realizada automaticamente com base em uma taxa predefinida. Nas etapas C e D, o sistema de controle avançado OCS-4D© foi usado para alterar a taxa de reposição, considerando a potência do moinho como indicador do grau de enchimento. A implementação das modificações levou a uma maior estabilidade da potência e, conseqüentemente, no grau de enchimento.

Este trabalho tem como objetivo dois pontos principais. O primeiro é melhorar o desempenho do processo de moagem por meio de modelos matemáticos que relacionem o grau de enchi-

mento do moinho com a potência do motor. O segundo é desenvolver um algoritmo de otimização que ajude na tomada de decisão, permitindo prever o momento e a quantidade apropriada de corpos moedores a serem repostos em cada moinho.

O restante deste artigo está organizado como segue. A Seção 2 descreve o problema. A Seção 3 apresenta os conceitos de moagem e modelos matemáticos para estimar o grau de enchimento e potência do moinho. A Seção 4 apresenta a correlação entre o grau de enchimento e a potência do moinho, assim como a obtenção da potência líquida relativa aos corpos moedores. A Seção 5 descreve o algoritmo proposto, enquanto a Seção 6 reporta os resultados dos experimentos. Por fim, a Seção 7 apresenta as considerações finais e as perspectivas de trabalhos futuros.

2. Caracterização do Problema

O presente estudo trata o processo de moagem em uma usina de beneficiamento de minério de ferro em Itabira-MG, pertencente à Vale S.A, que processa o minério Itabirito. A moagem é dividida em duas etapas: primária e secundária. A moagem primária é realizada em circuito aberto sem carga circulante, enquanto a secundária é realizada em circuito fechado, conforme mostra a Figura 1. Existem três moinhos instalados em cada sistema de reposição de corpos moedores, divididos em sistemas de reposição de bolas para moinhos primários e secundários. Esses sistemas podem abastecer apenas um moinho de cada vez.

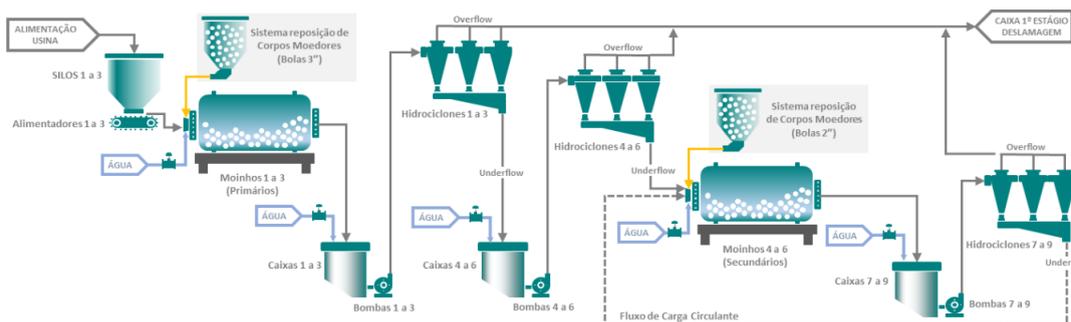


Figura 1: Fluxograma do Processo. Fonte: Autor.

O planejamento de reposição dos corpos moedores nos moinhos é realizada manualmente pelo técnico de controle operacional durante seu turno de trabalho. Durante esse planejamento podem surgir dificuldades que afetam a performance do processo de moagem, tais como interferência operacional na escolha da ordem dos moinhos para reabastecimento de corpos moedores e na quantidade a ser reposta, sobrecarga ou subcarga nos moinhos por conta de reposições irregulares, produção de carga circulante nos moinhos secundários pela submoagem nos moinhos primários, incidência de expurgos de corpos moedores devido excesso de enchimento, além da produção inconsistente de material com granulometria de $+0,15 \text{ mm}$ na flotação. Um estudo foi realizado para avaliar a “saúde da potência do moinho”, que consiste em analisar a quantidade de tempo em que os moinhos operaram dentro da faixa ideal de potência, e o seu impacto no tempo em que a flotação processou o material com percentual de $+0,15 \text{ mm}$ dentro das especificações como produto gerado pela moagem, durante o período de 01/01/2022 a 01/10/2022. A Figura 2 mostra que há uma correlação entre as duas variáveis: para uma mesma faixa granulométrica da alimentação na moagem, à medida que a saúde da potência diminui, a saúde do percentual de $+0,15 \text{ mm}$ na alimentação da flotação dentro da faixa desejada também diminui.

3. Referencial Teórico

Nesta seção, é apresentado o referencial teórico do estudo, que se divide em quatro subseções. A primeira e segunda subseções descrevem o processo de moagem e os moinhos, res-

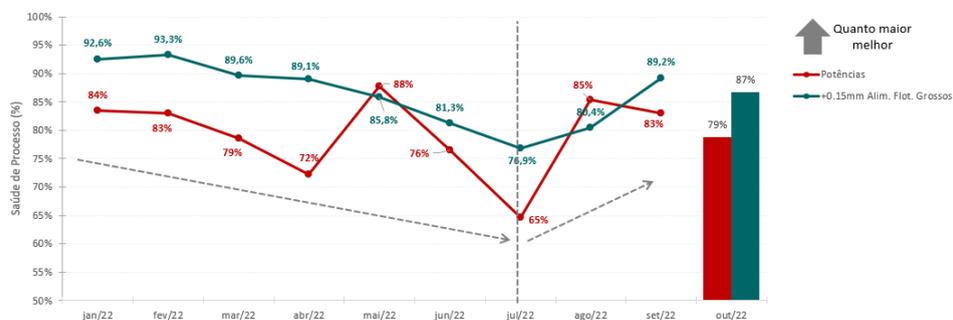


Figura 2: Correlação entre as saúdes da potência dos moinhos e da geração de +0.15mm na flotação de grossos. Fonte: Autor.

pectivamente. A terceira subseção mostra como determinar o grau de enchimento de um moinho. Por sua vez, a última subseção mostra como calcular a potência de um moinho.

3.1. Moagem

A moagem é o estágio final da cominuição em beneficiamento de minério, onde ocorre a fragmentação do material em uma faixa mais fina de tamanho em comparação às etapas anteriores de britagem. Os mecanismos de fragmentação incluem impacto, compressão, abrasão e atrito, reduzindo o tamanho do material para permitir a liberação das espécies minerais para concentração posterior.

O processo de moagem pode ser realizado a seco ou úmido, dependendo do processo subsequente e do material a ser moído. A moagem a seco é necessária para alguns materiais por causa das mudanças químicas ou físicas que ocorrem quando a água é adicionada; isso causa menos desgaste do revestimento na carcaça e nos meios de moagem, mas produz uma alta proporção de finos, o que em alguns casos é benéfico [Luz et al., 2010]. Já a moagem úmida é o método mais comum de processamento de minérios, é o mais econômico e o mais adequado para processos subsequentes. Segundo esses autores, os benefícios da moagem úmida são: menor consumo de energia específica em kWh/t ; possibilita o uso de classificação a úmido no controle de processo; uso dos meios de transporte como calhas, bombas e tubulações.

3.2. Moinhos

Os moinhos rotativos são amplamente utilizados na indústria de cominuição para reduzir o tamanho das partículas do minério. Eles são compostos por cilindros revestidos internamente com placas de desgaste e contêm corpos moedores, como bolas, barras ou clypebs (corpo moedor cilíndrico), que se movem livremente dentro do cilindro para realizar o trabalho de cominuição. Além disso, fragmentos do próprio minério também podem ser usados como meio de moagem. Existem diferentes tipos de moinhos rotativos, classificados de acordo com os tipos de meios de moagem utilizados para cominuir as partículas [Delboni Junior et al., 2010; Wendelin Wikedzi, 2018; Donkor, 2014].

Os moinhos AG recebem rochas grandes que são reduzidas em tamanho principalmente através do impacto. As partículas menores interrompem o processo de autoesmagamento devido ao movimento repetitivo [Bashe, 2019]. Os moinhos SAG, por outro lado, utilizam corpos moedores que se movimentam livremente dentro do tambor, quebrando o minério por meio de uma combinação de forças de impacto, atrito e abrasão, produzindo o tamanho de produto especificado [Wendelin Wikedzi, 2018]. Conforme Donkor [2014], na indústria de mineração, os moinhos semi-autógenos são geralmente empregados na moagem primária, utilizando 6-18% de esferas de aço

para realizar a cominuição, e caracterizados por um grande diâmetro e comprimento curto. Em contrapartida, os moinhos de bolas são comumente utilizados para moagem secundária, com esferas de aço ocupando entre 30-40% do volume do moinho, conforme mostra a Figura 3. Esses moinhos normalmente têm um diâmetro menor e comprimento maior em comparação aos moinhos SAG.

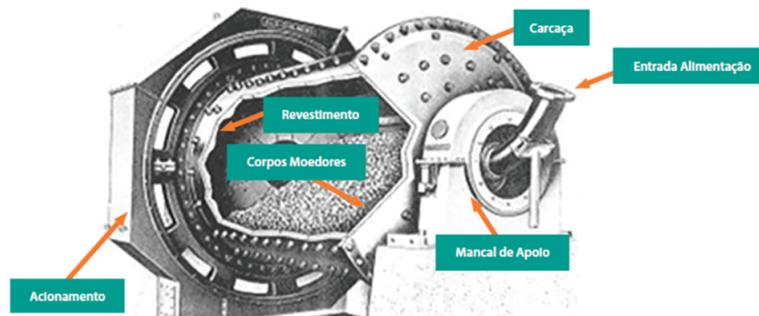


Figura 3: Exemplo de um moinho de bolas. Fonte: Autor.

3.3. Fator ou Grau de Enchimento

O grau de enchimento é determinado como a fração do volume interno do moinho que é ocupada pelos corpos moedores em conjunto com a polpa [Wendelin Wikedzi, 2018]. O grau de enchimento pode ser estimado pela Equação (1), de acordo com Luz et al. [2010]:

$$F = 113 - 126 \frac{H_c}{D} \quad (1)$$

em que:

- F = fator ou grau de enchimento, em [%];
- H_c = distância do topo do moinho ao topo da carga em repouso, em metros;
- D = diâmetro interno do moinho, em metros.

3.4. Potência do Moinho

De acordo com Beraldo [1987], a massa dos corpos moedores depende do volume do moinho, da porcentagem de carga do meio e da densidade aparente da carga, incluindo vazios. Esferas de aço forjadas ou fundidas têm densidade média de $4,646 \text{ kg/m}^3$, enquanto esferas de ferro fundido têm densidade média de $4,165 \text{ kg/m}^3$. Portanto, a massa de corpos moedores, no interior do moinho, pode ser calculada pela Equação (2):

$$T = 0,785 D^2 L \rho V_p \quad (2)$$

em que:

- T = carga de corpos moedores, em kg;
- D = diâmetro do moinho, interno ao revestimento, em metros;
- L = comprimento do moinho, em metros;
- ρ = densidade aparente da carga, em kg/m^3 ;

- V_p = Fração do volume do moinho ocupado por bolas.

A equação de Rowland, que estima a potência por tonelada de bolas, para moinhos com diâmetro maiores que 2,44 m, é dada pela Equação (3):

$$kW_b = 4,879 D^{0,3} (3,2 - 3V_p) C_s \left(1 - \frac{0,1}{2(9-10C_s)}\right) + S_s \quad (3)$$

na qual:

- kW_b = kW por tonelada de bolas, no pinhão;
- C_s = fração da velocidade crítica;
- S_s = fator de correção para o tamanho de bolas;

Segundo Rowland, para moinhos com diâmetro maior que 3,3 m, o tamanho da esfera afeta o consumo de energia conforme a Equação (4):

$$S_s = 1,102 \frac{B - 12,5 D}{50,8} \quad (4)$$

na qual:

- B = diâmetro da maior bola utilizada (*topsize*), em milímetros;
- S_s = só deve ser considerado quando o diâmetro das bolas for menor que 1/80 do diâmetro do moinho.

A potência no pinhão do moinho pode ser estimada pela Equação (5):

$$P_p = kW_b 1000T \quad (5)$$

em que P_p = Potência no pinhão, em kW.

Por fim, a potência mecânica no eixo do motor, que é a relação entre a potência no pinhão e a eficiência de engrenamento, pode ser estimada pela Equação (6):

$$P_m = \frac{P_p}{\eta} \quad (6)$$

em que:

- P_m = Potência mecânica no eixo do motor do moinho, em (kW);
- η = Eficiência de engrenamento.

4. Material e Métodos

Esta seção aborda dois tópicos: a correlação entre o grau de enchimento e a potência do moinho na Subseção 4.1 e a potência líquida do moinho na Subseção 4.2.

4.1. Correlação entre o Grau de Enchimento e a Potência do Moinho

Os moinhos analisados são classificados como moinhos de bolas com sistema de descarga por transbordo (*overflow*) e possuem um diâmetro interno de 5,49 m e um comprimento interno de 8,84 m. Com revestimento (*lifters*), o diâmetro interno (D) é de 5,33 m e o comprimento interno (L) é de 8,69 m. Eles operam a uma porcentagem da velocidade crítica (C_s) de 75,45%. A bola de maior diâmetro (B) usada mede 76,2 mm. A eficiência de engrenamento no eixo do pinhão (η) é de 92%, com potência nominal do motor de 4.500 kW. A altura livre da superfície da carga até o topo do moinho (H_c) pode variar entre 3,48 m até 3,74 m, enquanto a densidade aparente da carga de corpos moedores (ρ) é de 4,646 kg/m³.

Com base nos valores previamente apresentados, é possível determinar o grau de enchimento (V_p) ideal do moinho utilizando a Equação (1). Quando o valor de H_c é de 3,48 m e D é igual a 5,49 m, o grau de enchimento ideal é de 27%. Já quando H_c é de 3,74 m, o grau de enchimento ideal é de 33%. A Figura 4a apresenta a correlação dos modelos entre o grau de enchimento do moinho e a potência do motor, enquanto a Figura 4b mostra a correlação entre o grau de enchimento e o peso da carga, possibilitando saber a quantidade de corpos moedores (T) presentes no moinho, com base nas equações da Seção 3.4.

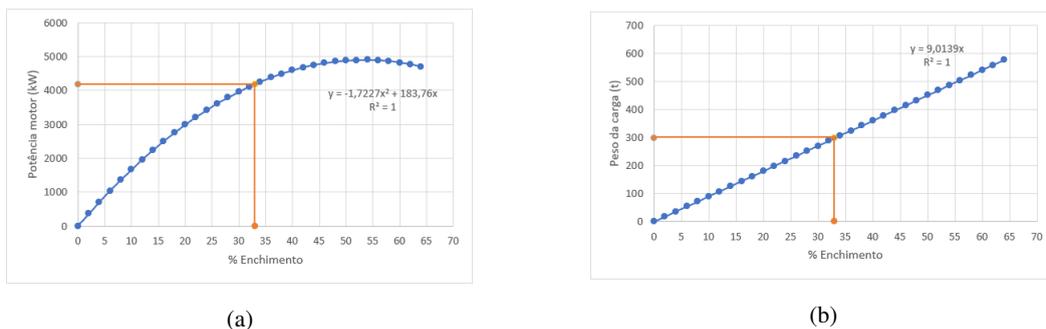


Figura 4: Correlação entre a potência no motor do moinho com o grau de enchimento e o peso da carga.
 Fonte: Autor.

Desta forma, o grau de enchimento do moinho pode ser estimado pela Equação (7):

$$V_p = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

na qual:

- $a = -1,7227$;
- $b = 183,76$;
- $c =$ Potência no motor em kW.

Por sua vez, o peso da carga de bolas no moinho pode ser estimado pela Equação (8):

$$T = 9,0139V_p \quad (8)$$

De acordo com as especificações do fabricante, os moinhos foram concebidos para operar com uma taxa máxima de alimentação de 1100 t/h, uma porcentagem de sólidos de 78% e um consumo específico de energia de 7,8 kWh/t, com um grau de enchimento de 33%. Portanto, a

potência no motor, para estas condições, deve ser de 4.188 kW e o peso dos corpos moedores no interior do moinho de $297,46 \text{ t}$.

4.2. Potência Líquida do Moinho

A potência no eixo do pinhão do moinho quando contém apenas corpos moedores é descrita pela Equação (6). No entanto, a Figura 5 mostra que há uma diferença na potência quando o moinho está sendo alimentado com material e quando não há alimentação. Quando a alimentação é interrompida, o volume de vazios aumenta devido à diminuição da quantidade de material no moinho, permitindo que as bolas dentro do moinho se movam com mais facilidade e aumentem a velocidade de rotação. No entanto, essa velocidade está diretamente relacionada ao consumo de energia do moinho, que aumenta à medida que a velocidade aumenta.

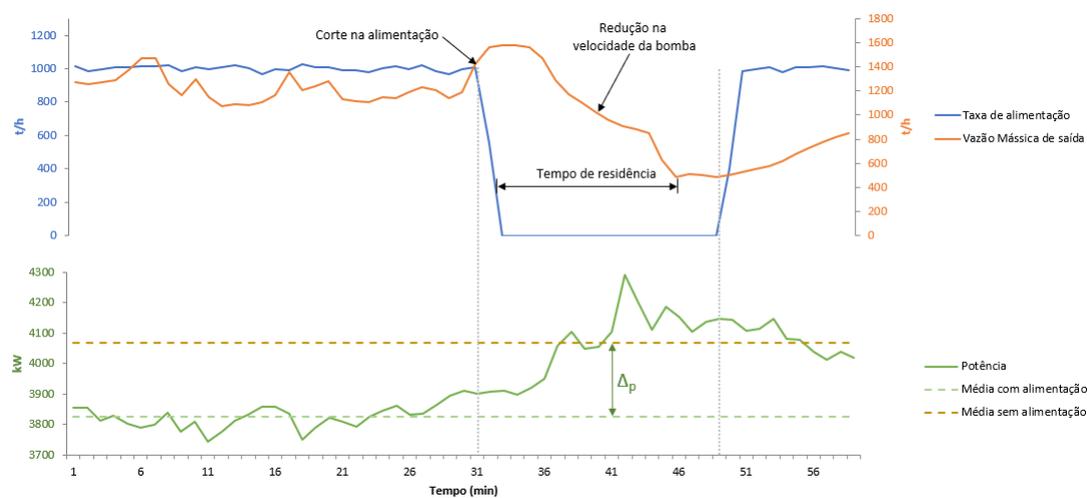


Figura 5: Exemplo da potência do moinho com alimentação e sem alimentação. Fonte: Autor.

O tempo de “esvaziamento” do moinho, conhecido como tempo de residência, pode ser medido observando-se as mudanças no balanço de massa na caixa de saída do moinho. Antes do corte da alimentação, a caixa é alimentada pela vazão de saída do moinho, bem como pelas vazões dos circuitos de realimentação. Depois que a alimentação é desligada, a bomba de polpa reduz a velocidade de bombeamento para manter o nível da caixa. Uma vez que o tempo de residência é alcançado, pode-se estimar que o moinho contém “apenas” corpos moedores.

Análises de 1477 medições do tempo de residência durante o período de 2019 a 2020 revelaram que os tempos estavam concentrados entre 4 e 15 minutos. Para garantir a precisão dos dados, um filtro foi aplicado para eliminar quaisquer valores fora desse intervalo, resultando em 340 medições válidas e uma média de tempo de residência de 10 minutos. Com o objetivo de estabelecer uma correlação entre as potências do moinho neste período, foram usados os valores médios de potência dos moinhos contidos no banco de dados, totalizando 1082 medições. Ao analisar esses valores, foi possível observar que as diferenças das potências (Δ_p) estavam concentrados entre 100 kW e 300 kW . Portanto, um filtro foi aplicado para eliminar quaisquer valores fora desse intervalo, resultando em 793 medições válidas e uma média de (Δ_p) de 175 kW .

Desta forma, a potência líquida do moinho com corpos moedores, nomeada P_{mliq} , pode ser calculada pela Equação (9), que correlaciona a potência descrita na Equação (6) com Δ_p :

$$P_{mliq} = P_m + \Delta_p \quad (9)$$

5. Algoritmo de Resolução

O Algoritmo 1 mostra como construir uma solução para a reposição de corpos moedores no moinho. Nas linhas 1 e 2 são inicializadas a matriz solução s e o vetor de horizonte de planejamento, respectivamente. Em seguida, na linha 3, a potência de cada moinho é corrigida para considerar apenas corpos moedores no interior do moinho. Na linha 4 é calculada a quantidade total de corpos moedores que cada moinho deve receber com base na diferença do peso da carga atual e o peso da carga desejado, calculada conforme Equação (8). Na linha 5 é iniciado um novo conjunto contendo os moinhos ordenados em ordem crescente de potência. Na linha 6 é iniciada a sequência de reposição de corpos moedores nos moinhos. Nas linhas 7 e 8, a quantidade de corpos moedores totalizada no moinho é zerada e a quantidade restante é preenchida com a quantidade total que o moinho deverá receber de corpos moedores, respectivamente. Na linha 9, o valor de reposição de corpos moedores no moinho no instante de planejamento é zerado. Logo em seguida, um laço de repetição é inserido na linha 10 até que o totalizador contabilize a quantidade total da reposição no moinho. Caso a quantidade de reposição máxima seja menor que a quantidade restante a ser repostas (linha 11), é incrementado $quantMin$ kg até que se atinja a quantidade máxima possível de reposição $quantMax$ (linhas 12 e 13). Caso a quantidade de reposição máxima seja maior que a quantidade de reposição restante, é incrementado $quantMin$ unidades até que se atinja o valor da quantidade restante (linhas 17 e 18). Nas linhas 21 e 22, a quantidade totalizada e a restante são atualizadas, respectivamente. Na linha 23, o índice do horizonte de planejamento é incrementado e na linha 24 é verificado se o horizonte de planejamento já foi todo preenchido. Por fim, na linha 25, quando o final do horizonte de planejamento for alcançado, é retornada a matriz solução para a reposição de corpos moedores para cada moinho em cada instante de tempo.

6. Experimentos Computacionais

O algoritmo proposto foi implementado na linguagem C++ usando o compilador gratuito *OnlineGDB beta* (<https://www.onlinegdb.com/>). Os experimentos foram realizados em dois cenários de produção reais relativos ao circuito de moagem primária da planta de Itabira-MG, que possui três moinhos e um dosador de bolas compartilhado. O sistema de dosagem de bolas é capaz de dosar no mínimo 30 kg ($quantMin$), sendo esta a quantidade mínima definida como $setpoint$, e no máximo 4320 kg ($quantMax$) por hora. O horizonte de planejamento da reposição foi discretizado por hora e os resultados do algoritmo foram comparados com os coletados pelo historiador da planta. Em ambos os cenários, considerou-se um tempo de ciclo de operação de 12 horas, o qual representa um turno de trabalho.

As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, os resultados da reposição de corpos moedores nos cenários 1 e 2 em um turno de 12 h de trabalho.

No primeiro cenário, a alimentação média dos moinhos foi de 1000 t/h , com uma concentração de sólidos de 78%. Os moinhos 1 a 3 tiveram potências de operação (P_0) de 3900 kW , 3904 kW e 3887 kW , respectivamente. Utilizando a Equação (9), as potências líquidas foram de 4075 kW , 4079 kW e 4062 kW , e as cargas de bolas, obtidas com a Equação (8), foram de 283,44 t , 283,92 t e 281,86 t , respectivamente. No entanto, a carga de bolas ideal para os moinhos seria de 297,46 t . Logo, seria necessário adicionar 14 t no moinho 1, 13,5 t no moinho 2 e 15,6 t no moinho 3. A Tabela 1 mostra que o operador realizou uma reposição total de 5,81 t no moinho 1 e 5,22 t no moinho 3, sem um critério claro de reposição. Já o algoritmo proposto ordenou a reposição iniciando pelo moinho de menor potência e propôs a reposição de 14 t no moinho 1, 13,53 t no moinho 2 e 15,59 t no moinho 3. O algoritmo teve um desempenho superior ao do operador, pois, ao realizar a reposição iniciando pelo moinho com menor potência e utilizar modelos matemáticos para determinar a quantidade ideal de corpos moedores a serem adicionados a cada

Algoritmo 1: Algoritmo Construtivo para Reposição de Corpos Moedores

Entrada: Quantidade mínima de reposição (*quantMin*), quantidade máxima de reposição (*quantMax*), potência inicial de cada moinho (P_0), valor de correção da potência de cada moinho (Δ), horizonte de planejamento (I), conjunto de moinhos (J)

Saída: Solução s

```

1   $s \leftarrow \emptyset$ ;
2   $i \leftarrow 1$ ;
3   $P_0 \leftarrow P_0 + \Delta$ ;
4   $T_k \leftarrow$  Quantidade total de corpos moedores do moinho  $k, \forall k \in J$ ; /* Conforme a Equação (8) */
5   $J' \leftarrow$  Conjunto  $J$  ordenado em ordem crescente pela potência dos moinhos;
6  para cada moinho  $k \in J'$  faça
7       $qtdeTotal \leftarrow 0$ ;
8       $qtdeRestante \leftarrow T_k$ ;
9      enquanto  $qtdeTotal \leq T_k - quantMin$  faça
10          $s_{ik} \leftarrow 0$ ;
11         se  $quantMax \leq qtdeRestante - quantMin$  então
12             enquanto  $s_{ik} < quantMax$  faça
13                  $s_{ik} \leftarrow s_{ik} + quantMin$ ;
14             fim
15         fim
16         senão
17             enquanto  $s_{ik} \leq qtdeRestante - quantMin$  faça
18                  $s_{ik} \leftarrow s_{ik} + quantMin$ ;
19             fim
20         fim
21          $qtdeTotal \leftarrow qtdeTotal + s_{ik}$ ; /* Atualize a quantidade total a ser dosada */
22          $qtdeRestante \leftarrow qtdeRestante - s_{ik}$ ; /* Atualize a quant. restante a ser dosada */
23          $i \leftarrow i + 1$ ;
24         se  $i \geq |I|$  então
25             Break;
26         fim
27     fim
28 fim
29 retorna  $s$ ;
    
```

moinho, ele buscou equilibrar as potências desses moinhos próximas à desejada. Essa abordagem resultou em uma distribuição mais equilibrada da carga de bolas, com uma maior quantidade de bolas adicionadas ao moinho com menor potência, o que traz uma melhora geral no desempenho do processo de moagem.

No segundo cenário, a alimentação média dos moinhos foi de 985 t/h com uma concentração de sólidos de 70%. Os moinhos 1 a 3 tiveram potências de operação (P_0) de 4095 kW, 3918 kW e 3982 kW, respectivamente. As potências líquidas dos moinhos foram de 4270 kW, 4093 kW e 4157 kW, e as cargas de bolas foram de 308,31 t, 285,61 t e 293,44 t. Para este cenário, seria necessário adicionar 11,85 t no moinho 2 e 4 t no moinho 3. Observa-se que, semelhantemente ao ocorrido no cenário 1, o algoritmo ordenou a reposição a partir do moinho com menor potência e identificou que não seria necessário repor corpos moedores no moinho 1, pois existiam corpos moedores em excesso; fato que o operador não levou em consideração.

7. Considerações Finais

O objetivo deste estudo foi propor uma metodologia para melhorar o desempenho do processo de moagem em uma usina de beneficiamento de minério de ferro. Foram utilizados modelos matemáticos para correlacionar o grau de enchimento do moinho e a potência do motor, além de um sistema de otimização para ajudar na tomada de decisão sobre a reposição dos corpos moedores. Foi identificado que a garantia da saúde da potência dos moinhos está diretamente relacionada à granulometria do material produzido pela moagem.

Tabela 1: Resultado da reposição de corpos moedores no Cenário 1 em um turno de 12 h de trabalho

Instante (i)	Solução do operador			Solução do algoritmo proposto		
	Mo. 1 (kg)	Mo. 2 (kg)	Mo. 3 (kg)	Mo. 1 (kg)	Mo. 2 (kg)	Mo. 3 (kg)
1	573	0	0	0	0	4320
2	0	0	0	0	0	4320
3	0	0	1522	0	0	4320
4	0	0	0	0	0	2580
5	0	0	0	4320	0	0
6	0	0	0	4320	0	0
7	0	0	0	4320	0	0
8	0	0	0	1050	0	0
9	0	0	2656	0	4320	0
10	0	0	1045	0	4320	0
11	1436	0	0	0	4320	0
12	3809	0	0	0	570	0

Fonte: Autor.

Tabela 2: Resultado da reposição de corpos moedores no Cenário 2 em um turno de 12 h de trabalho

Instante (i)	Solução do operador			Solução do algoritmo proposto		
	Mo. 1 (kg)	Mo. 2 (kg)	Mo. 3 (kg)	Mo. 1 (kg)	Mo. 2 (kg)	Mo. 3 (kg)
1	0	0	0	0	4320	0
2	0	0	0	0	4320	0
3	1997	0	0	0	3180	0
4	0	0	1987	0	0	3930
5	0	0	1760	0	0	0
6	0	0	230	0	0	0
7	0	0	30	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1916	0	0	0
10	0	1968	0	0	0	0
11	1848	0	0	0	0	0
12	139	0	0	0	0	0

Fonte: Autor.

Para solucionar os problemas encontrados na reposição dos corpos moedores, foi proposto um algoritmo construtivo que ordena os moinhos pela potência e define a quantidade de corpos moedores a serem repostos em cada um deles de acordo com a diferença entre o peso da carga atual e o peso da carga desejada. Com isso, espera-se aumentar a eficiência do processo de moagem e reduzir os problemas operacionais decorrentes da reposição de corpos moedores em moinhos.

Uma sugestão adicional para otimizar o processo de moagem é utilizar não apenas o peso da carga atual e desejada, mas também os dados da taxa de alimentação, granulometria do material na alimentação e na saída, e o consumo energético específico ideal. Além disso, é possível empregar algoritmos de refinamento baseados em busca local para melhorar ainda mais a eficiência da moagem e reduzir os custos operacionais da usina.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (código de financiamento 001), CNPq (processo 303266/2019-8), FAPEMIG (processo CEX-PPM-676-17), Vale S.A., Instituto Tecnológico Vale (ITV) e Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pelo apoio ao desenvolvimento do presente trabalho.

Referências

- Bashe, L. (2019). *Optimisation of the classical semi-autogenous and ball milling circuit using the attainable region technique*. Tese de doutorado, UNISA - University of South Africa, South Africa. Disponível em <https://uir.unisa.ac.za/handle/10500/26693>.
- Beraldo, J. L. (1987). Moagem de minérios em moinhos tubulares. *Secretaria de Estado da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, São Paulo*. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/371580749/Moagem-de-Minerios-Em-Moinhos-Tubulares-Beraldo-1987>.
- Delboni Junior, H., Sampaio, J. A., e Lima, R. A. (2010). Circuitos industriais de moagem autógena e semiautógena. In *Tratamento de minérios*, chapter 4.3, p. 187–221. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 6ª edição. Disponível em <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2176>.
- Donkor, S. B. (2014). On-line sensors for measuring the total ball and charge level in tumbling mills. Tese de doutorado, University of Cape Town, South Africa. Disponível em https://open.uct.ac.za/bitstream/handle/11427/13225/thesis_ebe_2014_donkor_sb.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Gontijo, H. M., Gontijo, M. M., Panzera, R., Pereira, P. M. M., de Lima Silva, J. F., Fernandes, A. B., e Tadeu, A. (2017). Reposição automática de corpos moedores via controle avançado. In *18º Simpósio de Mineração, ABM Week*, São Paulo, SP, 2 a 6 de outubro. Disponível em <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/reposicao-automatica-de-corpos-moedores-via-controle-avancado>.
- Keshav, P., de Haas, B., Clermont, B., Mainza, A., e Moys, M. (2011). Optimisation of the secondary ball mill using an on-line ball and pulp load sensor—the sensomag. *Minerals Engineering*, 24(3-4):325–334. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687510002980>.
- Luz, A. B. d., Sampaio, J. A., e França, S. C. A. (2010). *Tratamento de minérios*. CETEM/MCT, Rio de Janeiro. Disponível em <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/476/4/tratamento-de-minerios-5-edicao.pdf>.
- Opazo, H. A. R., TORRES, T. A. L., INOSTROZA, J. A. I., Olivares, J. A. P., Reyes, W. M. V., BERNARDINO, J. Y., e PERALTA, L. E. V. (2022). System for in-line estimation of load distribution in a rotary mill. US Patent 11,241,693. Disponível em <http://https://patents.google.com/patent/US11241693B2/en>.
- Rezaeizadeh, M., Mirzadeh, S., et al. (2022). Modeling and multi-objective optimization of operating parameters in semi autogenous grinding mill. *Research Square*. Disponível em <https://assets.researchsquare.com/files/rs-1491673/v1/5cb35335-47bb-4033-8ed9-a0a62b6d2909.pdf?c=1667478846>.
- Wendelin Wikedzi, A. (2018). *Optimization and Performance of Grinding Circuits: The Case of Buzwagi Gold Mine (BGM)*. Tese de doutorado, Technische Universität Bergakademie, Faculty of Mechanical, Freiberg, Germany. Disponível em <https://tubaf.qucosa.de/api/qucosa%3A23217/attachment/ATT-0/>.