

PLANEJAMENTO DA REPOSIÇÃO DE CORPOS MOEDORES EM MOINHOS DE BOLAS: UM ESTUDO DE CASO.

Daniel Luiz de Souza

Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação
de Processos de Mineração

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) - Escola de Minas
Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, CEP 35402-204, Ouro Preto - MG

daniel.luiz.souza@vale.com

Dissertação de Mestrado ¹ - Defesa: 29 de abril de 2024

Orientador: Marcone Jamilson Freitas Souza (UFOP)

Coorientador: Luciano Perdigão Cota (ITV)

RESUMO

Este estudo aborda o problema de planejamento da reposição de corpos moedores no processo de moagem. Foi proposto um controlador fuzzy para determinar a potência recomendada dos moinhos e um modelo preditivo para estimar essa potência. Uma formulação MILP e um algoritmo baseado no *Enhanced Iterated Local Search* (E-ILS) foram propostos para determinar o instante e a quantidade recomendada de corpos moedores a serem repostos em cada moinho. Os métodos foram testados em instâncias da Usina Cauê da Vale S.A. Comparado com o Gurobi, o E-ILS alcançou soluções ótimas com uma variabilidade média de 1%. Diante disso, o E-ILS foi integrado a um sistema de decisão com uma arquitetura de dois níveis. O nível superior planeja a reposição com o E-ILS, enquanto o nível inferior a executa em um PLC industrial. A implantação em 2024 resultou em uma redução de 17% no consumo de corpos moedores.

PALAVRAS CHAVE. Moagem, Moinhos de bolas, Reposição de corpos moedores, Iterated Local Search, Programação Linear Inteira Mista.

Tópicos: POI – PO na Indústria, OA – Outras Aplicações em PO

ABSTRACT

This study addresses the grinding ball replacement planning problem. We proposed a fuzzy controller to determine the recommended power of the mills and a predictive model to estimate this power. Also, we proposed a MILP formulation and an algorithm based on Enhanced Iterated Local Search (E-ILS) to determine the instant and the recommended bulk weight of the grinding balls to be replaced in each mill. We test the methods on instances from the Vale S.A.'s Cauê Plant. Compared to Gurobi, E-ILS achieved optimal solutions with an average variability of 1%. With this good result, we integrate the E-ILS into a decision system with a two-level architecture. The higher level plans the replacement with E-ILS, while the lower level executes it in an industrial PLC. Implementation in 2024 resulted in a 17% reduction in the consumption of grinding balls.

KEYWORDS. Grinding, Ball mills, Ball replacement, Iterated Local Search, Mixed-Integer Linear Programming.

Paper topics: Industry OR, OA – Others OR Applications

¹Este trabalho apresenta um resumo conciso da dissertação de mestrado disponível em <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/20055>

1. Introdução

A cominuição desempenha um papel essencial em muitos processos de beneficiamento mineral. Seus principais objetivos são: ajustar o tamanho das partículas do material para estágios subsequentes, aumentar a área de superfície das partículas e adequar o tamanho das partículas para comercialização imediata. Geralmente, a cominuição é realizada em duas etapas: britagem e moagem. Na britagem, o minério é comprimido contra superfícies rígidas e móveis. Já na moagem, a redução do tamanho ocorre por meio da combinação de impacto, compressão, abrasão e fricção, causadas pelo movimento do meio de moagem dentro do moinho [Gupta e Yan, 2016].

Este trabalho concentra-se na etapa de moagem do processo de cominuição. Conforme destacado por Yin et al. [2023], a energia necessária para fragmentar o material e o esforço mecânico envolvido no processo de moagem têm um impacto significativo na sua eficiência. Além disso, a moagem representa o maior custo no tratamento de minério [Jeswiet e Szekeres, 2016], tornando a otimização uma prioridade para as empresas. Rodrigues et al. [2021] exploraram formas de reduzir o consumo de energia por tonelada de minério durante a moagem, destacando o grau de enchimento como um fator importante. Este parâmetro, que é a relação entre o volume da carga e o volume total do moinho, influencia o desempenho, o consumo de energia e o tamanho final das partículas. Operar com o enchimento recomendado é essencial para otimizar a energia e maximizar a produção [Opazo et al., 2022].

No contexto descrito, Keshav et al. [2011] desenvolveram o “Sensormag”, um sensor interno que mostrou alta precisão nas estimativas de nível de enchimento e concentração de sólidos. Martins et al. [2013] criaram uma bola instrumentada com sensores e câmeras para medir o grau de enchimento, ajustando um modelo de elementos discretos (DEM) com base nos resultados experimentais. Opazo et al. [2022] desenvolveram um sistema de controle em tempo real para moinhos semi-autógenos, utilizando sensores para medir vibrações e sons, enquanto Shumway e Kuznetsov [2019] criaram um sistema similar para moinhos autógenos e semi-autógenos, ajustando automaticamente a operação do moinho. Nayak et al. [2020] propuseram um método baseado em sinais de vibração e redes neurais artificiais, destacando a Transformada Rápida de Fourier como a técnica mais eficaz para estimar o nível de enchimento. De acordo com Strutzel [2014], os diferentes níveis de controle e automação em processos industriais podem ser representados pela pirâmide de controle de processos (ver Figura. 1).



Figura 1: Representação da pirâmide de controle de processo. Adaptado de Strutzel [2014].

Os estudos existentes focam em técnicas de controle dos níveis 1, 2 e 3 da pirâmide de controle de processos, visando decisões imediatas sobre a reposição de corpos moedores, sem considerar o planejamento ao longo de um turno. Além disso, não abordam a medição do consumo específico de energia e a porcentagem de moagem do material para inferir a potência recomendada, nem estimam a potência instantânea dos moinhos com base em dados operacionais como taxa de alimentação e porcentagem de sólidos, entre outros.

Para preencher essa lacuna, este estudo explora o nível 4 da pirâmide de controle de processos, introduzindo o Problema de Planejamento da Reposição de Corpos Moedores (GBRPP). Esse planejamento é realizado para um turno de trabalho no processo de moagem de minério de ferro em moinhos de bolas. O estudo apresenta um controlador fuzzy para determinar a potência recomendada dos moinhos a partir dos valores de energia específica consumida e do tamanho do produto final no processo de cominuição, bem como um modelo preditivo para estimar a potência dos moinhos com base em dados operacionais.

Foi desenvolvido um sistema de decisão implementado em uma arquitetura de dois níveis, integrando um modelo de otimização para a tomada de decisões no nível superior e um Controlador Lógico Programável (PLC) industrial para executá-lo em tempo real no nível inferior. Também foi proposta uma formulação de programação linear inteira mista (MILP) para representar o GBRPP. Além disso, foi desenvolvido um algoritmo baseado no Iterated Local Search que explora características específicas do GBRPP para obter o planejamento reposição dos corpos moedores para um turno de trabalho. A Figura. 2 ilustra em cinza o esquema de funcionamento da proposta para esse planejamento.

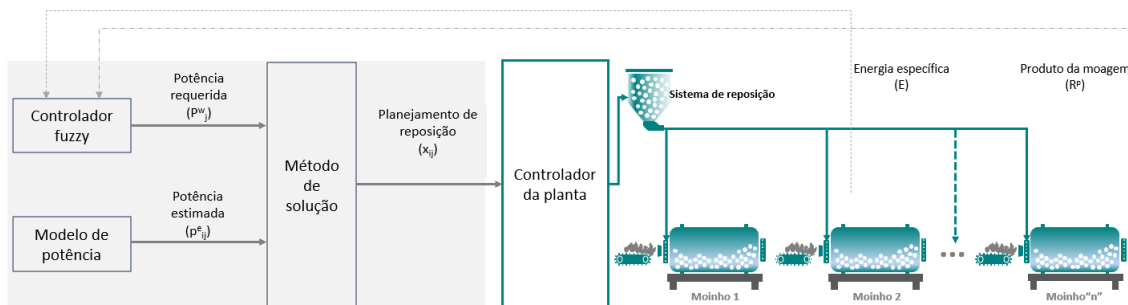


Figura 2: Proposta para otimizar o planejamento da reposição de corpos moedores.

As principais contribuições deste estudo são: 1) um controlador fuzzy para determinar a potência recomendada para os moinhos em tempo real; 2) um modelo preditivo para estimar a potência dos moinhos; 3) uma formulação MILP para representar o problema e determinar o momento adequado e a quantidade, em massa, de corpos moedores a serem substituídos em cada moinho; 4) uma adaptação do algoritmo E-ILS [Oliveira et al., 2023], projetada para explorar as características específicas do problema e encontrar soluções de alta qualidade; 5) um sistema de decisão desenvolvido em uma arquitetura de dois níveis, onde o nível superior propõe a reposição dos corpos moedores através do E-ILS e o nível inferior executa essa solução por meio de um PLC industrial; e 6) uma redução estimada em 2,4 milhões de dólares nos custos relacionados a reposição das bolas por ano na mina objeto do estudo de caso.

2. Descrição do Problema

Este estudo concentra-se no processo de moagem em uma planta de processamento de minério de ferro em Itabira, MG, pertencente à Vale S.A., especializada no tratamento de minério de itabirito. Esta etapa do processo de cominuição é responsável por 60% dos custos de aquisição de matéria-prima da planta. O processo de moagem é dividido em duas etapas distintas: primária e secundária. A moagem primária ocorre em um circuito aberto, sem carga circulante, enquanto a moagem secundária é realizada em um circuito fechado, conforme ilustrado no diagrama de fluxo do processo na Figura 3. Existem dois sistemas de reposição de corpos moedores, um para os moinhos primários e outro para os moinhos secundários. Cada sistema inclui três moinhos que só podem ser abastecidos com corpos moedores de forma independente.

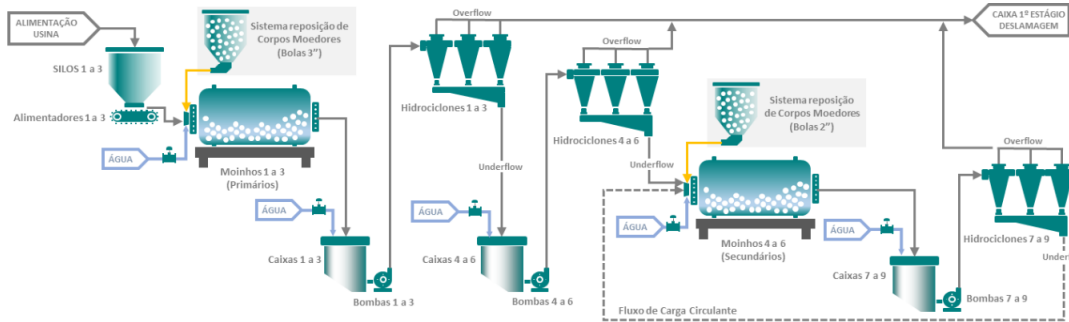


Figura 3: Fluxograma de processo.

O planejamento da reposição de corpos moedores nos moinhos, supervisionado pelo técnico de controle operacional, enfrenta diversos desafios operacionais. Entre esses desafios, destaca-se a complexidade de determinar a potência recomendada para os moinhos e escolher o momento e a quantidade, em massa, adequada de corpos moedores para reposição. Uma escolha inadequada pode resultar em sobrecargas ou subcargas nos moinhos e na criação de carga circulante nos moinhos secundários, eventualmente eliminando os corpos moedores devido ao excesso de enchimento. Essas dificuldades impactam significativamente a produção de material com tamanho de partícula superior a 0,15 mm para a próxima etapa de beneficiamento da planta, a flotação, resultando na necessidade de melhorar a gestão da reposição de corpos moedores para otimizar o desempenho da moagem.

Para representar o problema GBRPP, uma formulação de programação não linear inteira mista (MINLP) foi desenvolvida e está disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2025.106975>. Nesta formulação, a função objetivo é descrita pela Expressão (1), que visa a minimização da soma da diferença absoluta entre a potência recomendada (P_j^w) e a potência estimada (p_{ij}^e) para cada moinho j em cada instante i do horizonte de planejamento.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} |P_j^w - p_{ij}^e| \quad (1)$$

A formulação anterior foi linearizada, uma vez que a função objetivo (1) é uma função linear por partes.

3. Sistema de Decisão

O Sistema de Decisão para o GBRPP é composto por 3 módulos: (1) um controlador fuzzy para determinar a potência recomendada para os moinhos em tempo real; (2) um modelo preditivo para estimar a potência dos moinhos; e (3) um algoritmo baseado em E-ILS para otimizar o planejamento da reposição de corpos moedores a partir das características específicas do problema. O sistema de decisão foi implantado em uma arquitetura de dois níveis, onde o nível superior propõe a reposição dos corpos moedores por meio do E-ILS e o nível inferior executa essa solução em tempo real por meio de um controlador industrial.

3.1. Determinação da potência recomendada através do controlador fuzzy

O controlador fuzzy foi desenvolvido com nove regras de inferência combinando três faixas de valores para cada uma das entradas, sendo estas o consumo energético específico (E) e o percentual do tamanho da partícula superior a 0,15 mm no produto da moagem (R^p). Durante o processo de desfuzzificação, a variável de saída fuzzy, que representa a potência recomendada (P_j^w), foi determinada como multiplicadores da potência atual (P_j^0) do moinho j .

3.2. Modelo preditivo para estimar a potência dos moinhos

O modelo preditivo para estimar a potência dos moinhos foi desenvolvido através de análise de regressão dos dados operacionais como taxa de alimentação do minério, água, corpos moedores, e vazão de alimentação dos hidrociclones. Assim, a Equação (2) é utilizada para estimar a potência (p_{ij}^e) de cada moinho j em cada instante i . Ela fornece uma estimativa baseada na análise do incremento p_{ij}^r e no decaimento P_{ij}^d de potência dos moinhos em diferentes momentos.

$$p_{ij}^e = p_{[i-1]j}^e + (p_{ij}^r - P_{ij}^d) \quad \forall i \geq 2, \quad (2)$$

3.3. Enhanced ILS

O E-ILS foi proposto para encontrar soluções de alta qualidade para este problema. Ele difere do ILS tradicional ao alterar o nível de perturbação apenas após um certo número de iterações sem melhora durante o processo de busca.

Uma solução para o problema é representada por uma matriz $s = (s_{ij})_{n \times m}$, em que n representa o horizonte de planejamento, m é o número de moinhos, e s_{ij} indica a quantidade, em massa, de corpos moedores repostos no moinho j no instante i . Neste problema, apenas um moinho é alimentado por vez devido à presença de uma única linha de alimentação. A Tabela 1 mostra um exemplo com $m = 3$ moinhos e $n = 6$ instantes. Nesta tabela, o Moinho 1 recebe uma reposição de 360 kg de bolas de moagem no instante 2, enquanto o Moinho 2 é alimentado com 390 kg de bolas de moagem no instante seguinte. Além disso, a tabela mostra a potência estimada de cada moinho para cada instante.

Tabela 1: Exemplo de reposição de corpos moedores em cada instante de planejamento.

Instante (i)	x (kg)			p^e (kW)		
	Moinho 1	Moinho 2	Moinho 3	Moinho 1	Moinho 2	Moinho 3
1	480	0	0	3952	3987	4002
2	360	0	0	3953	3984	3999
3	0	390	0	3950	3985	3994
4	0	0	0	3948	3983	3991
5	0	0	570	3945	3980	3994
6	0	0	210	3942	3977	3995

Uma solução s é avaliada pela função de avaliação $f(s)$, dada pela Equação (3), que deve ser minimizada. Nesta equação, P_j^w representa a potência recomendada para o moinho j , e p_{ij}^e representa a potência estimada para o moinho j no instante i , calculada de acordo com a Eq. (2).

$$f(s) = \sum_{i=1}^{|I|} \sum_{j=1}^{|J|} |P_j^w - p_{ij}^e| \quad (3)$$

A solução inicial do algoritmo E-ILS é gerada com base na correlação entre o grau de enchimento e a potência do motor. Para explorar o espaço de soluções do problema foram desenvolvidos seis tipos de movimentos, cada um resultando em uma estrutura de vizinhança $\mathcal{N}_i, i = 1, \dots, 6$. O procedimento de busca local é realizada pelo método *Random Variable Neighborhood Descent* (RVND) [Souza et al., 2010], utilizando as seis estruturas de vizinhança com a estratégia de *Primeira Melhoria* (FI). O procedimento de perturbação consiste em aplicar perturbações de intensidade *nível* na solução atual usando a vizinhança $\mathcal{N}_6$.

4. Estudo de caso

O E-ILS proposto foi validado usando um estudo de caso do circuito de moagem primária na planta de Itabira da Vale S.A., no Brasil. O experimento utilizou 30 instâncias representando

dados de produção de 15 dias nesta planta, em turnos diários de trabalho de 12 horas. A Fig.4 mostra esses resultados graficamente. A Figura 4(a) mostra as reposições feitas pelo operador e as sugestões feitas pelo algoritmo E-ILS. Por sua vez, a Fig.4(b) e a Fig. 4(c) mostram os resultados previstos para o consumo específico de energia e o percentual de partículas maiores que 0,15 mm no produto da moagem, com base no método de Donda.

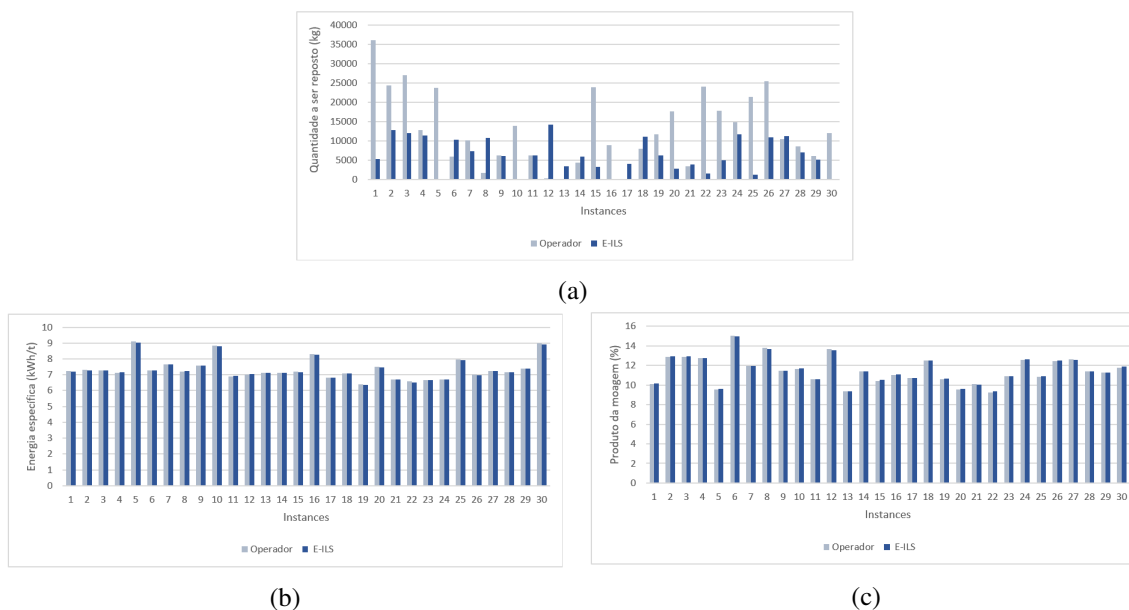


Figura 4: Comparação entre as soluções do operador e as do algoritmo E-ILS.

Os resultados para cada instância em relação à função objetivo definida pela decisão do operador, pelo solver Gurobi e pelo algoritmo proposto através da Equação (3) foram comparadas. O algoritmo E-ILS encontrou o ótimo global em todas as instâncias, e o RPD médio foi de aproximadamente 1%. A Fig. 4 mostra que, em muitas instâncias, o algoritmo E-ILS sugeriu reposições em quantidades menores do que as do operador. Considerando todas as instâncias, as reposições sugeridas pelo algoritmo E-ILS resultariam em uma redução média de 48% na quantidade, em massa, de corpos moedores. Apesar dessa redução, de acordo com o método de Donda, o consumo específico de energia e o tamanho das partículas do produto da moagem Estariam dentro das especificações esperadas.

O E-ILS foi escolhido como método de otimização no DS proposto devido à sua boa convergência e capacidade de encontrar soluções ótimas rapidamente. A planta usa o controlador IC-3173, programado com LabVIEW, o que impede a implementação do MILP com bibliotecas nativas. Embora drivers externos possam ser usados, eles podem comprometer a segurança. Assim, o algoritmo heurístico é executado 30 vezes, retornando a melhor solução.

5. Conclusões

Este estudo abordou o problema da reposição de corpos moedores nos moinhos durante o processo de moagem de minério de ferro. O objetivo foi manter o consumo específico de energia e o percentual de partículas com tamanho superior a 0,15 mm do produto final da moagem para a flotação dentro dos valores recomendados durante o processo de moagem. Foi desenvolvido um controlador fuzzy para identificar os valores de potência de trabalho recomendados para os moinhos e proposta uma formulação MILP para representar o problema. O solver Gurobi, versão 11, foi utilizado para obter soluções ótimas a partir da formulação MILP. Também foi desenvolvido um

algoritmo baseado em E-ILS, que utiliza seis vizinhanças especialmente projetadas para lidar com este problema. Finalmente, uma arquitetura de dois níveis foi desenvolvida para implementar o algoritmo E-ILS no nível superior e executar sua solução em tempo real através de um controlador lógico industrial no nível inferior. Os métodos Gurobi e E-ILS foram avaliados em 30 instâncias reais do processo de moagem na Usina Cauê da Vale S.A., representando 15 dias de operação. O E-ILS superou o método do operador em termos de função objetivo e precisão das potências recomendadas. Comparado ao Gurobi, o E-ILS encontrou o ótimo em todas as instâncias, com um desvio médio de 1%. Além disso, o sistema de decisão foi aplicado, resultando em uma redução estimada em 17% no consumo de corpos moedores por ano. Houve também ganhos significativos no consumo de energia específica e na qualidade do material entregue para a flotação.

6. Produtos

Este trabalho resultou na geração dos seguintes produtos:

Produtos científicos :

1. de Souza, Daniel L., Santos, M. S., Costa, C. P., Souza, M. J., & Cota, L. P. (2025). A MILP formulation and an Iterated Local Search-based algorithm for the grinding ball replacement planning problem. *Computers & Operations Research*, v. 177, p. 106975. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.106975>.
2. de Souza, Daniel L., Santos, M. S., Costa, C. P., Souza, M. J., & Cota, L. P. A. (2023). Otimização da reposição de corpos moedores em moinhos de bolas. *Proceedings do LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO 2023*. São José dos Campos. Disponível em <https://doi.org/10.59254/sbpo-2023-174807>
3. de Souza, Daniel L. (2024). Planejamento da Reposição de Corpos Moedores em Moinhos de Bolas. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto. Disponível em <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/20055>.

Produtos tecnológicos :

1. de Souza, Daniel L., Santos, M. S., Costa, C. P., Souza, M. J., & Cota, L. P. A. (2024). Método e Sistema para Otimizar a Reposição de Corpos Moedores em Moinhos de Bolas a Úmido, e Meio Legível Por Controlador Industrial. BR 10 2024 018024 0. Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI. Disponível em <https://drive.google.com/file/d/1u8v2M87C9LaEqYdHJXIOOSvwMYvK8CGW/view?usp=sharing>
2. de Souza, Daniel L., Santos, M. S., Costa, C. P., Souza, M. J., & Cota, L. P. A. (2024). ORCm: Sistema de Otimização da Reposição de Corpos moedores. Usina de Cauê, Complexo Itabira-MG, Vale S.A, Agosto de 2024.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES, Finance Code 001), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, grants 303266/2019-8, 311074/2023-5, and 302629/2023-8), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, grant PPM CEX 676/17), do Instituto Tecnológico Vale (ITV), da Vale S.A. e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Referências

- Gupta, A. e Yan, D. S. (2016). *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction*. Elsevier, Amsterdam, 2 edition. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63589-1.00023-X>.
- Jeswiet, J. e Szekeres, A. (2016). Energy consumption in mining comminution. *Procedia CIRP*, 48:140–145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>.
- 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*, 24:325–334. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.10.011>.
- Martins, S., Li, W., Radziszewski, P., Faucher, A., e Makni, S. (2013). Experimental and simulated instrumented ball in a tumbling mill — A comparison. *Minerals Engineering*, 43-44:79–84. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.09.002>.
- Nayak, D. K., Das, D. P., Behera, S. K., e Das, S. P. (2020). Monitoring the fill level of a ball mill using vibration sensing and artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 32: 1501–1511. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04555-5>.
- Oliveira, F. A., de Sá, E. M., de Souza, S. R., e Souza, M. J. F. (2023). ILS-based algorithms for the profit maximizing uncapacitated hub network design problem with multiple allocation. *Computers & Operations Research*, 157:106252. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106252>.
- 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. Google Patents. US Patent 11,241,693. <https://patents.google.com/patent/US11241693B2/en>.
- Rodrigues, A. F., Delboni Jr, H., Powell, M. S., e Tavares, L. M. (2021). Comparing strategies for grinding itabirite iron ores in autogenous and semi-autogenous pilot-scale mills. *Minerals Engineering*, 163:106780. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106780>.
- Shumway, S. D. e Kuznetsov, S. (2019). System to control a charge volume of an autogenous mill or a semi-autogenous mill. Google Patents. US Patent 10,399,089. <https://patents.google.com/patent/US10399089B1/en>.
- Souza, M. J. F., Coelho, I. M., Ribas, S., Santos, H. G., e Merschmann, L. H. C. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2):1041–1051. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.05.031>.
- Strutzel, F. A. M. (2014). Controle ihmpc de um processo industrial de hidrotratamento de diesel. Master's thesis, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil. <https://doi.org/10.11606/D.3.2014.tde-24062014-102335>.
- Yin, Z., Wang, N., Li, T., e Peng, Y. (2023). Experimental investigation of the impact breakage characteristics between grinding media and iron ore particle in ball mills. *Advanced Powder Technology*, 34(4):103982. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.103982>.