

# Aumento da continuidade operacional de um circuito de britagem por meio de um controlador *override*

Kaike S. Albuquerque<sup>\*,\*\*\*\*</sup> Alexandre M. S. T. Filho<sup>\*\*\*\*</sup>  
Alexandre G. Fonseca<sup>\*</sup> Robson A. Duarte<sup>\*</sup> Karine I. Marins<sup>\*\*,†</sup>  
Thiago A. M. Euzébio<sup>\*\*\*,\*\*\*\*</sup> Thomás V. B. Pinto<sup>\*\*,‡</sup>

<sup>\*</sup> Vale S.A., (e-mails: {alexandre.gomes.fonseca, rodrigo.fina, robson.duarte1, kaike.albuquerque}@vale.com).

<sup>\*\*</sup> Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, MG (e-mail: kaike.albuquerque@aluno.itv.org, thomas.pinto@itv.org)

<sup>\*\*\*</sup> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institute of Fluid Dynamics, 01328 Dresden, Germany; (e-mail: t.melo-euzebio@hzdr.de)

<sup>\*\*\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG

<sup>†</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG

<sup>‡</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG

---

**Abstract:** In the mining industry, bins are used as *buffers* to store material and smooth out variations in the rate of ore transported between processes. The level control of these bins is an essential task to maintain the operational continuity of activities. In this work, a *override* controller was proposed for the tertiary crushing circuit of Serra Sul, Vale S.A. The intention is that the new control strategy in *override* improves the operational continuity of the circuit through the low level controller of the bins. Results of the practical application, showed a reduction of approximately 83% in the occurrences of microstops related to the operated hours. This new strategy did not compromise the crushers chamber level and resulted in an increase in crushing efficiency through process stability.

**Resumo:** Na indústria mineral, silos são usados como *buffers* para armazenar o material e suavizar as variações de taxa de minério transportada entre os processos. O controle de nível destes silos é uma tarefa essencial para manter a continuidade operacional das atividades. Neste trabalho, foi proposto um controlador *override* para o circuito de britagem terciária da usina de Serra Sul, Vale S.A. O intuito é que a nova estratégia de controle em *override* melhore a continuidade operacional do circuito por meio do controlador de nível baixo dos silos. Resultados da aplicação prática mostraram uma redução de aproximadamente 83% nas ocorrências de microparasadas relacionadas as horas operadas. Essa nova estratégia não comprometeu o nível de câmara dos britadores e resultou em um aumento na eficiência da britagem através da estabilidade de processo.

*Keywords:* Crushing; Override controller; Bins; Level control; Operational continuity.

*Palavras-chaves:* Britagem; Controle *override*; Silos; Controle de nível; Continuidade operacional.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria mineral frequentemente utiliza conjuntos de silos para armazenar minério durante o processo de beneficiamento em uma planta de processamento. Esses silos desempenham o papel de *buffers*, atenuando perturbações devido a variações na taxa de produção ou pequenas interrupções entre as etapas do processo. Isso garante um fluxo contínuo de material e maior estabilidade para as etapas subsequentes. Para assegurar a eficácia dos silos, é crucial manter o nível de material dentro de uma faixa operacional adequada. Caso contrário, intertravamentos podem ser acionados para evitar transbordamentos ou

esgotamento, ambos representando riscos para a operação. A ocorrência desses intertravamentos pode resultar em paradas indesejadas, levando a instabilidade no processo e perdas de produção momentâneas.

Uma abordagem comum para a distribuição de material é por meio de um sistema de cabeça móvel retrátil, que se move de um silo para outro, despejando material sob o silo abaixo dele. Alguns estudos propuseram estratégias de controle para o nível destes silos por meio da manipulação do cabeça móvel. Caldas (2018) apresentou um algoritmo de otimização linear inteira mista para controle de posicionamento do cabeça móvel. O objetivo era reduzir

a variabilidade do nível dos silos apesar das variações das condições operacionais do processo. Albuquerque et al. (2019) implementou um controlador baseado em regras para melhoria da distribuição de material em silos por meio do controle da velocidade de movimentação do cabeça móvel e regras para definição do número de linhas adequadas ao cenário. O controlador monitora o nível instantâneo de todos os silos e atua sob a velocidade do cabeça móvel de modo que o nível médio se mantenha próximo à uma referência previamente estabelecida.

Uma outra abordagem para o controle de nível nos silos é por meio da manipulação da velocidade dos alimentadores. Como em Fonseca (2022), em que um controlador *fuzzy* foi proposto para atuar sob a velocidade dos alimentadores de um circuito de peneiramento de modo a melhorar a distribuição do material entre os silos, e conseqüentemente, aumentar a eficiência do processo. As variáveis monitoradas pelo *fuzzy* são os níveis dos silos e a distância do cabeça móvel. As funções de pertinência e regras foram criadas de tal modo que a taxa de retirada de material fosse reduzida nos silos com menor nível (evitando intertravamento) e maior distância, e fosse maior nos silos com nível mais elevado e menor distância. Resultados da aplicação prática desse controlador apontaram melhorias na distribuição do material além de aumento de produtividade.

O tema e ganhos proposto neste trabalho está amplamente ligado a aplicação do *Health Aware Control* que emerge como uma estratégia inovadora na operação de sistemas de britagem, integrando informações de saúde do equipamento em tempo real Smith (2021). Essa abordagem permite ajustes automáticos dos parâmetros do britador com base nos dados de saúde, como a adaptação da taxa de alimentação em resposta a vibrações anormais Li (2020). Além de otimizar a eficiência energética e a vida útil dos componentes, essa integração reduz paralisações não programadas e contribui para a segurança dos trabalhadores, ao evitar operações inadequadas. A aplicação do *Health Aware Control* demonstra promissoras melhorias em setores como mineração e processamento mineral, transformando a operação e manutenção de sistemas de britagem Smith (2021); Li (2020).

Neste trabalho, um controlador *override* foi projetado com o objetivo de reduzir a quantidade de microparasdas dos alimentadores que abastecem os britadores terciários da usina de Serra Sul. Definimos microparasdas como parasdas com duração menor que 300 segundos, o que apesar de curtas, geram descontinuidade operacional, e conseqüentemente, uma perda considerável de eficiência de britagem e produção no longo prazo. Resultados práticos de aplicação do novo controle são apresentados e comparados com a estratégia de controle aplicada anteriormente.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira: Na Seção 2 é apresentado o circuito de britagem terciária de Serra Sul. O controlador *override* proposto é mostrado na Seção 3. Na Seção 4, são discutidos os resultados da aplicação prática, e finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção 5.

## 2. O PROCESSO DE BRITAGEM TERCIÁRIA EM SERRA SUL

A Figura 1 mostra o circuito de britagem terciária de Serra Sul, local de estudo e de aplicação da estratégia de controle proposta. Esta etapa do circuito é composto por um transportador tipo *cabeça móvel* que despeja o minério nas quatro linhas de produção, cada uma possuindo um silo, um alimentador e um britador hidrocônico. A distribuição de material neste circuito é feita por meio de um cabeça móvel que se locomove segundo a estratégia de controle apresentada em Albuquerque et al. (2019). O alimentador, de velocidade variável, é responsável por retirar material do silo e transportá-lo ao britador e manter o nível de câmara do britador conforme *setpoint* solicitado. Desta forma a velocidade do alimentador é controlada de maneira que o nível da câmara do britador se mantenha sempre cheia.

A etapa de britagem terciária é conectada, em circuito fechado, ao peneiramento secundário da planta, conforme mostrado na Figura 2. O *overflow* do peneiramento secundário -i.e., material retido nas peneiras por não apresentar o tamanho adequado ao processo alimenta a britagem terciária. Por sua vez, o produto da britagem terciária é recirculado para alimentar novamente o processo de peneiramento secundário e o *underflow* do peneiramento é o produto final de processo.

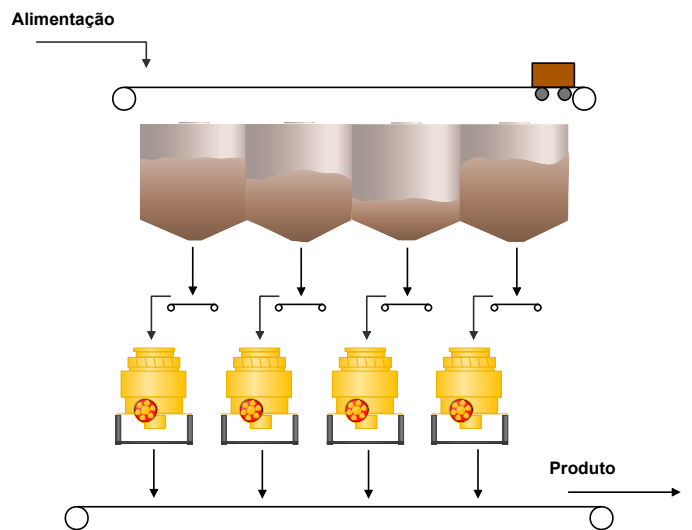


Figura 1. Britagem Terciária em Serra Sul.

Devido ao acoplamento entre os processos, reduções de taxa ou parasdas de produção em uma das etapas afetam diretamente a outra. Por exemplo, caso o nível de algum silo da britagem terciária atinja um valor baixo e o intertravamento seja acionado, o alimentador correspondente é parado. Conseqüentemente, apenas o material presente na câmara do britador está disponível para britagem e peneiramento secundário. Isso resulta na redução da produção da britagem terciária e perturbações no circuito, especialmente prejudiciais, pois o peneiramento secundário é o último processo de beneficiamento e sua produção constitui o produto final da usina.

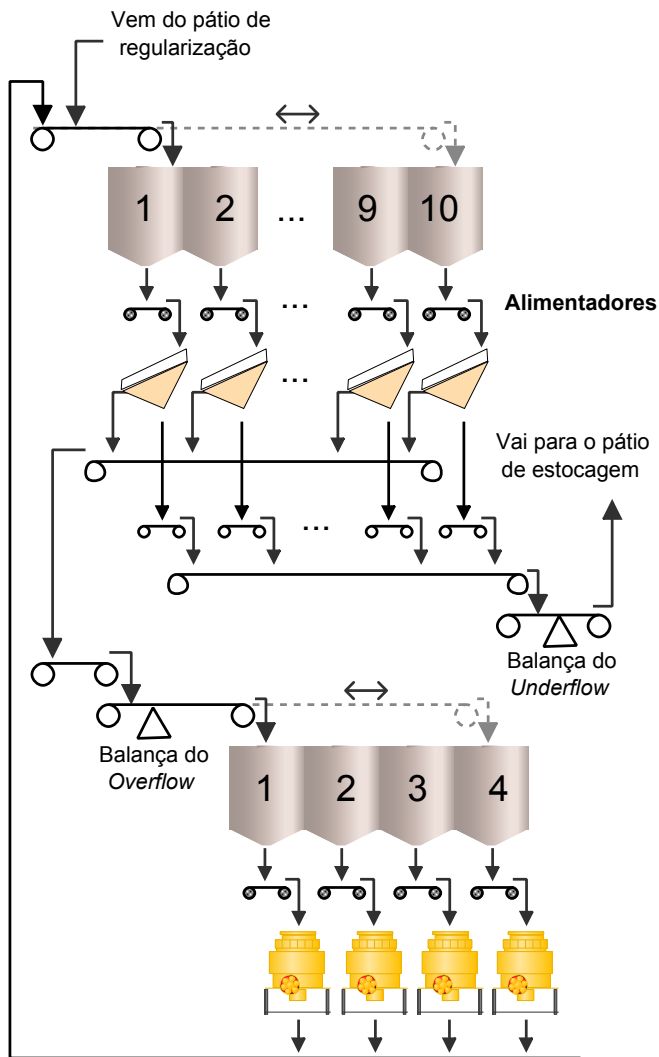


Figura 2. Fluxograma do peneiramento secundário e da britagem terciária de Serra Sul.

Fonte: (Duarte et al., 2020)

Apesar do controle automático da movimentação e seleção de silos pelo cabeça móvel para distribuição do material, ainda ocorrem muitas microparasas devido à variação na taxa de alimentação e outras condições operacionais. Os intertravamentos por nível baixo são acionados quando o nível do silo atinge ou cai abaixo do limite de 10%. Nesse momento, o alimentador abaixo do silo é interrompido para evitar seu esvaziamento total, mitigando riscos operacionais relacionados ao trabalho a vazio dos alimentadores. O período de parada do alimentador é o tempo necessário para o cabeça móvel alcançar o silo intertravado e preenchê-lo até atingir 25% de seu nível. Quando essa duração é inferior a 300 segundos, é denominada microparada

### 3. CONTROLADOR OVERRIDE PROPOSTO

A estratégia de controle utilizada na britagem terciária de Serra Sul é essencialmente um controle regulatório proporcional-integral (PI), em que a variável de processo é o nível da câmara do britador e a variável manipulada é a velocidade do alimentador. Isso ocorre porque, em um britador hidrocônico, a eficiência de britagem está intimamente ligada ao nível de material na câmara (Santos

et al., 2020). Isso se deve ao fato de que a diminuição nessa etapa ocorre principalmente através da compressão entre as partículas e do contato com os revestimentos. Um nível baixo reduz drasticamente a eficiência da etapa, pois elimina o contato entre as partículas, resultando em um produto granular que não atende aos padrões definidos, aumentando a carga circulante e acelerando o desgaste dos componentes do britador.

Essa estratégia de controle, entretanto, não considerava o nível do silo do alimentador, concentrando-se exclusivamente no nível da câmara do britador. Conseqüentemente, mesmo quando o nível do silo está baixo, a velocidade do alimentador não é ajustada para reduzir a taxa de retirada de material do silo e prevenir um intertravamento por baixo nível. Como resultado, era frequente ocorrerem paradas devido ao baixo nível, o que inevitavelmente levava à perda de eficiência da britagem, já que o nível da câmara diminuía por falta de alimentação do alimentador que havia sido interrompido.

O controlador *override* proposto neste trabalho teve como objetivo reduzir o número de intertravamentos dos alimentadores devido ao baixo nível, especialmente as microparasas. A estrutura do controlador é ilustrada na Figura 3. Nela, foram desenvolvidos dois controladores do tipo PI, um relacionado ao nível da câmara do britador e outro relacionado ao nível do silo. Um seletor de mínimo assegura que o controlador que gera o menor sinal de controle é o responsável por manipular a velocidade dos alimentadores.

Com o objetivo de garantir uma operação suave entre os controladores na estrutura de controle *override*, foi implementado um mecanismo de *tracking*. Em situações em que o nível de silo se encontra em um valor adequado, distante dos extremos, o controlador de nível baixo do silo entra em modo *tracking*, em que sua saída é determinada pela saída do controlador de nível da câmara, acrescida de um *offset*. Esse mecanismo permite a sincronização dos controladores, assegurando que o controlador de nível baixo se ajuste de forma precisa com base nas ações do controlador de nível da câmara. Dessa forma, é possível manter um controle eficiente e estável, promovendo uma operação adequada do sistema controlado.

O Controle Override é um tipo de controle no qual uma variável manipulada pode ser alterada através de várias variáveis controladas. Esse método de controle geralmente utiliza dois controladores simples, um seletor e uma única variável manipulada, de modo que monitorem-se as variáveis controladas do processo, exceto a PV controlada pelo controlador principal. Assim, o controlador secundário atua nas demais variáveis controladas, uma de cada vez, quando essas atingirem valores inesperados (Freitas Júnior, 2016).

Os valores relacionados aos parâmetros dos controladores PI e seus respectivos setpoints estão apresentados na Tabela 1. A definição do nível da câmara teve como base a recomendação de eficiência fornecida pelo fabricante. Para determinar o nível do silo, conduzimos uma série de testes abrangendo o deslocamento do cabeçote móvel de uma extremidade à outra. O objetivo era selecionar um valor que permitisse o movimento até o silo, evitando o esvaziamento, entretanto, que o nível não fosse alto suficiente para atuar sobre os alimentadores de forma desnecessária.

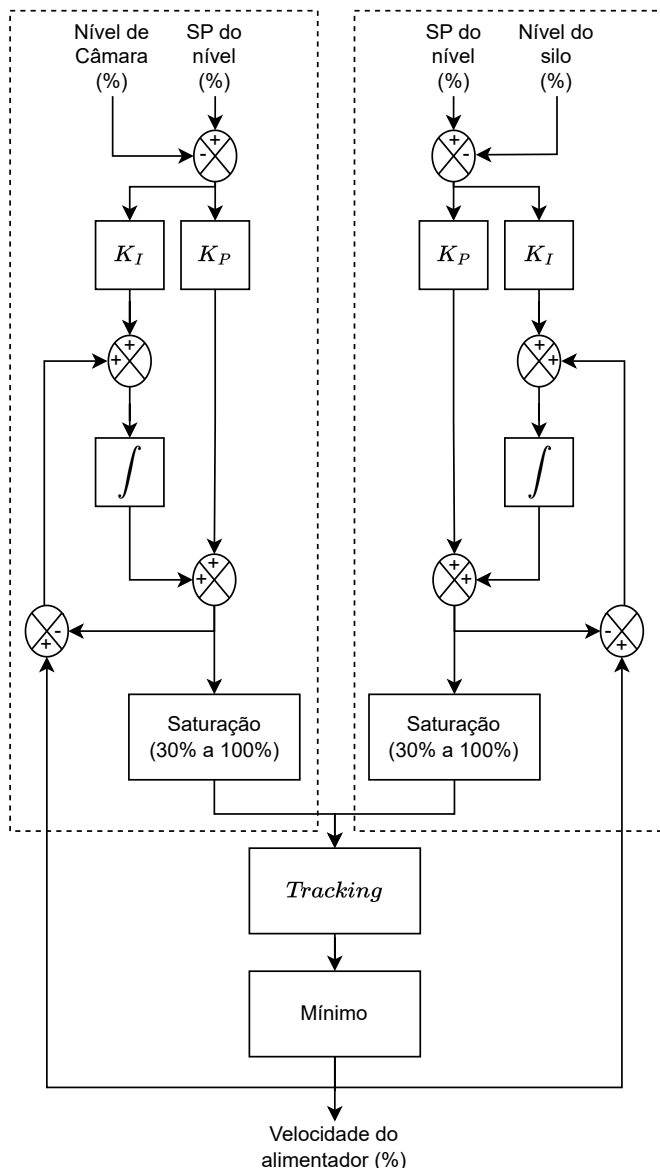


Figura 3. Estrutura do controlador *override* proposto.

Por fim, os parâmetros dos controladores, foram ajustados de forma empírica durante a operação dos equipamentos, procurando um ponto ótimo em termos de estabilidade e velocidade de correção, ou seja, não foi utilizado nenhum modelo para definição desses parâmetros, apenas testes industriais para realização de sintonia.,

Tabela 1. Parâmetros para o controle em *override*.

Parâmetro	Nível de câmara	Nível do silo
SP	80,0	35,0
$K_P$	1,5	3,0
$K_I$	40,0	20,0

#### 4. RESULTADOS

O complexo de Serra Sul é composto por três usinas similares que compartilham a mesma fonte de alimentação. Dessa forma, é possível implementar a nova estratégia em uma única usina e observar como ela se compara em relação as demais. O controlador *override* proposto

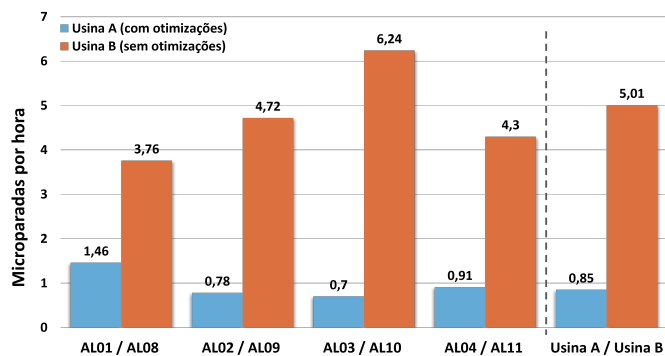


Figura 4. Frequência de microparadas.

foi desenvolvido no sistema de automação 800xA<sup>®</sup>, do fornecedor ABB, e implantado na usina A. Para avaliar sua eficácia, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos na usina A, com o controlador, e na usina B, sem o controlador, no período de 06/03/2023 a 15/04/2023.

Na Figura 4, é mostrado um comparativo da frequência de microparadas de cada alimentador dos circuitos de britagem terciária das usinas A e B. O termo frequência de microparadas foi um indicador criado para facilitar a análises que corresponde ao número de microparadas dividido pelas horas operadas do circuito, de modo que quanto maior este indicador menos é a estabilidade deste processo. Desta forma pode-se observar que o controle *override* obteve sucesso em reduzir significativamente este indicador frequência. Isso foi alcançado por meio de uma ação de controle que diminui a taxa de retirada de material do silo sempre que o nível do mesmo atinge um patamar abaixo de 35%. Essa redução permite que o cabeça móvel alcance e alimente o silo antes que ocorra um intertravamento devido ao nível baixo. Em média, a frequência das microparadas na usina A foi aproximadamente 83% menor em comparação com a usina B.

Por meio da análise do histograma de microparadas apresentado na Figura 5, pode-se observar uma redução significativa na na distribuição de microparadas ocorridas na usina A azul em que o controlador proposto foi implementado. Notavelmente, as microparadas com duração de até 40 segundos foram completamente eliminadas. No período analisado, a usina A registrou um total de 1.175 microparadas, enquanto a usina B apresentou 6.096 microparadas, apresentando assim uma redução de aproximadamente 83% no número absoluto de microparadas para o processo.

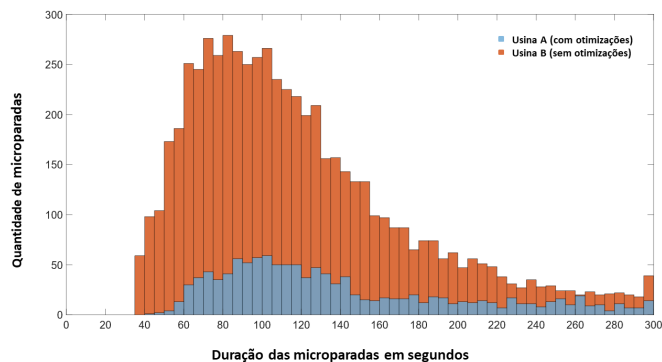


Figura 5. Histograma de microparadas pelo tempo

Uma preocupação relevante era compreender o impacto da atuação do controlador *override* em relação ao controle de nível do silo. Durante esses momentos, havia o receio de que o nível da câmara do britador diminuísse, comprometendo a sua eficiência de britagem. A Figura 6 apresenta o nível médio das câmaras dos britadores ao longo do período de testes comparativo entre as usinas A e B. Mesmo com a atuação do controlador *override*, o nível médio das câmaras dos britadores não foi significativamente alterado. Isso ocorreu devido ao tempo de recuperação mais rápido do nível da câmara na usina A com o controlador *override*, conforme ilustrado na Figura 7. Além disso, na usina B, onde não há o controlador *override*, o nível da câmara do britador diminuiu exclusivamente devido aos intertravamentos. Nestas circunstâncias, a câmara tende a esvaziar, levando o seu nível a se aproximar de zero. Como resultado, o tempo necessário para que o nível retorne ao valor desejado (*setpoint*) é mais demorado. É relevante notar que, a partir dos dados apresentados na Figura 7, torna-se evidente que a Usina A é capaz de restabelecer o nível desejado na câmara em menos de 60 segundos para cerca de 27% das situações, enquanto que para o restante (73% das ocorrências), leva mais tempo. Em contrapartida, na Usina B, apenas 3% das vezes o nível retorna em menos de 60 segundos, enquanto em 97% dos casos o tempo é superior a esse limite.

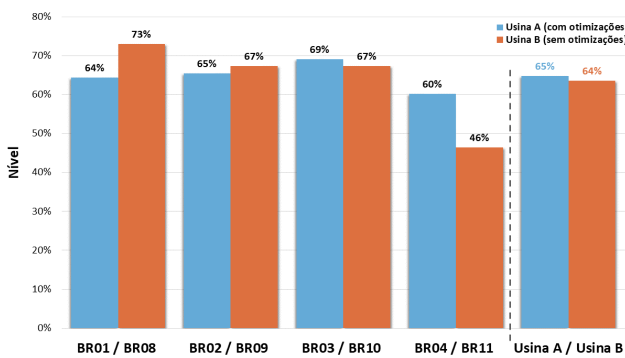


Figura 6. Nível de câmara dos britadores.

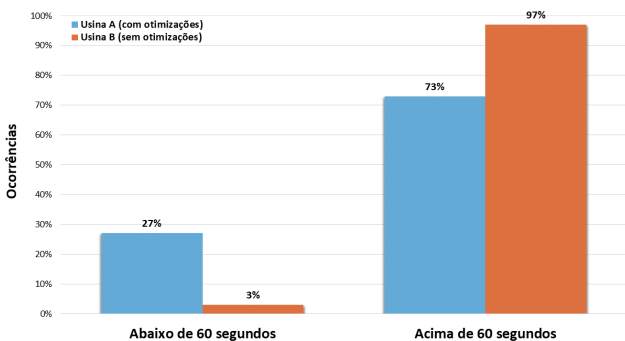


Figura 7. Recuperações de nível de câmara dos britadores.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo introduziu uma estratégia de controle *override* desenvolvida para otimizar a continuidade operacional de

um circuito de britagem por meio do controle dos níveis dos silos. A validação dessa estratégia foi realizada em uma usina real, e os resultados apontaram melhorias consideráveis em relação ao sistema de controle anterior, resultando em uma notável redução das microparadas de 83%. Essa abordagem permite a operação contínua do circuito, resultando em um aumento na produção, sem comprometer a eficiência do processo em termos do controle do nível da câmara do britador. Neste contexto, o controlador *override* proposto está atualmente em processo de expansão para abranger as outras duas usinas do mesmo complexo.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), do Instituto Tecnológico Vale (ITV) e da 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. *IFAC-PapersOnLine*, 52(14), 147–152.
- Caldas, Felipe Novaes Martins, A.X. (2018). Proposed solutions to the tripper car positioning problem. In *ICEIS (1)*, 344–352.
- Duarte, R.A., Pinto, T.V., Júnior, Ê.L., Fonseca, A.G., Albuquerque, K.S., and Euzébio, T.A. (2020). Ganhos de produtividade em um circuito de britagem devido à aplicação de controle override. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2.
- Fonseca, A.G. (2022). Controle fuzzy para aumento de eficiência do peneiramento no processamento mineral.
- Freitas Júnior, L.R.d. (2016). Otimização de retomadora de granéis via controle multivariável.
- Li, Qiang Wang, Y.C.X. (2020). Health-aware control of crushing systems based on dynamic learning. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 6710–6716. IEEE.
- Santos, M.S., Pinto, T.V., Júnior, Ê.L., Cota, L.P., Souza, M.J., and Euzébio, T.A. (2020). Simheuristic-based decision support system for efficiency improvement of an iron ore crusher circuit. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 94, 103789.
- Smith, John A. e Johnson, E.R. (2021). Health aware control strategies for enhanced crushing plant performance. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 12(4), 297–314.