

Ganhos de Produtividade em um Circuito de Britagem devido à Aplicação de Controle Override

Robson A. Duarte^{*,**} Thomás V. B. Pinto^{*,**}
 Ênio Lopes Júnior^{***} Alexandre G. Fonseca^{**,***}
 Kaike S. Albuquerque^{***} Thiago A. M. Euzébio^{*}

^{*} Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG (e-mails: {robson.duarte, thomas.pinto}@pq.itv.org, thiago.euzebio@itv.org).

^{**} 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

^{***} Vale S.A. (e-mails: {enio.lopes.junior, alexandre.gomes.fonseca, kaike.albuquerque}@vale.com)

Abstract: A crushing circuit reduces the size of the ore extracted from the mine to a useful one for the next mineral processing steps. In the crushing circuit, there is a screening stage that classifies the ore flow. The rate of material classified in the screening stage is directly related to the conveyor belts' capacity that receives the overflow and the underflow from the screens. In this sense, the control system that regulates the screens' feed rate is essential for productivity and operational safety. This paper presents the results of replacing a rule-based control system to an override control in a crushing circuit at a Vale SA plant in Canaã dos Carajás, Pará. The objective is to reduce the throughput rate variability and, consequently, increase productivity. The results indicate a potential for a 17.2% increase in the production rate.

Resumo: Um circuito de britagem reduz a granulometria do minério extraído da mina ao tamanho útil para as próximas etapas de processamento mineral. Dentro do circuito de britagem existe o estágio de peneiramento que classifica o fluxo de minério. A taxa de material classificada no peneiramento é diretamente relacionada à capacidade das correias transportadoras que recebem o *overflow* e o *underflow* das peneiras. Nesse sentido, o sistema de controle que regula a taxa de alimentação das peneiras é fundamental para a produtividade e segurança operacional. Nesse artigo são apresentados os resultados da substituição de um sistema de controle baseado em regras por um controle *override* em um circuito de britagem de uma usina da Vale S.A. em Canaã dos Carajás, Pará. O objetivo é o de reduzir a variabilidade da taxa de material produzido no sistema e, conseqüentemente, levar ao aumento de produtividade. Os resultados indicam um potencial de aumento de 17,2% de taxa de produção.

Keywords: Crushing; Rule-based control; Override control; Variability reduction.

Palavras-chaves: Britagem; Controle baseado em regras; Controle override; Redução de variabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do controle de processos na indústria de mineração é otimizar a recuperação de minerais valiosos, mantendo a qualidade dos concentrados entregues à indústria metalúrgica (Hodouin et al., 2001). Em uma usina de beneficiamento mineral existem centenas de malhas de controle operando simultaneamente nas diversas unidades operacionais, tais como britagem, moagem e flotação. Sem esse automatismo, seria impossível gerenciar plantas industriais tão complexas que podem produzir centenas de milhões de toneladas de minério por ano.

De acordo com o levantamento feito em Olivier e Craig (2017), grande parte das malhas de controle operando na mineração são do tipo PID, mas com crescente uso de

controle avançado, especialmente controle preditivo por modelo (Chen et al., 2007; Moreira e Euzébio, 2018; Reis et al., 2018) e controle especialista baseado em regras (Van Drunick et al., 2005; Albuquerque et al., 2019). Ainda de acordo com o estudo em Olivier e Craig (2017), mais da metade desses controladores avançados estão aplicados na camada de controle regulatório, ou seja, fora dos objetivos usuais para este tipo de controlador que é o de otimizar a produção e aprimorar o planejamento operacional da planta. Parte dessa inadequação de estratégias é explicada pela falsa ideia de que implantar métodos de controle mais sofisticados darão obrigatoriamente resultados superiores aos de um simples PI. Pode-se incluir também que, em geral, a formação de um engenheiro de minas no Brasil não possui disciplinas de controle de processos, o que torna mais fácil explicar o funcionamento de uma sequência

lógica de IF/ELSE do que a sintonia de um controlador proporcional-integral-derivativo.

Em S11D, uma usina da Vale S.A. em Canaã dos Carajás, Pará, um sistema especialista baseado em regras é utilizado para a definição da velocidade dos alimentadores das peneiras da etapa de peneiramento secundário. O controlador busca manter as taxas das correias transportadoras do *overflow* e do *underflow* na faixa de trabalho desejada. Porém, na prática, com a utilização desse controle, observam-se variações indesejadas na taxa de material transportado que levam à não utilização da capacidade esperada do equipamento. Essa situação impacta na produtividade da usina, fazendo com que a taxa produzida se distancie das metas definidas que consideram a utilização da capacidade nominal dos equipamentos.

Neste artigo é apresentada a diferença de produtividade obtida ao trocar uma solução de controle de sistema especialista por uma solução de controle de PI em *override*. Essa simplificação na estrutura de controle é inspirada em trabalhos como de Forsman (2016), que sugere a substituição do uso de MPC por combinações de controle clássico, e de Euzébio et al. (2020), que obtém resultados de aplicação satisfatórios com controle PID descentralizado frente estruturas centralizadas.

A solução proposta com o uso de PIs em *override* é apresentada em duas etapas: a primeira com o processo simulado para apresentar detalhes dos efeitos da alteração da estratégia de controle; e a segunda com os resultados obtidos de taxa de produção na planta real. O objetivo com esse artigo é o de evidenciar que soluções simples, quando bem formuladas, são capazes de obter melhores resultados ao se comparar com técnicas de controle mais sofisticadas na camada de controle regulatório.

2. CIRCUITO DE PENEIRAMENTO SECUNDÁRIO E BRITAGEM TERCIÁRIA DE S11D

O circuito estudado nesse trabalho compreende as áreas de peneiramento secundário e britagem terciária da usina de S11D. Representado na Figura 1, esse circuito tem como objetivo classificar o material baseando-se em sua granulometria e realizar nova fragmentação até que se atinjam os requisitos para que seja considerado produto final. O processo se inicia com o material proveniente do pátio de regularização sendo distribuído nos dez silos do peneiramento secundário por um sistema de correia transportadora com cabeça móvel. Na saída de cada um desses silos, existe um alimentador que faz a transferência de material para a peneira correspondente, sendo que a taxa de material transferida é proporcional à velocidade do alimentador. Após a etapa de peneiramento, o material que passou pelas aberturas das peneiras segue por uma correia transportadora para o pátio de estocagem de produto, com sua taxa registrada pela balança do *underflow*. O restante do material que foi alimentado nas peneiras, mas que não passou por suas aberturas, segue em direção à britagem terciária, passando pela balança do *overflow* para registro de sua taxa. Na britagem terciária, o sistema de correia transportadora com cabeça móvel faz a distribuição do material em quatro silos que possuem quatro alimentadores em suas saídas. A velocidade desses alimentadores é controlada de forma a manter as câmaras dos quatro bri-

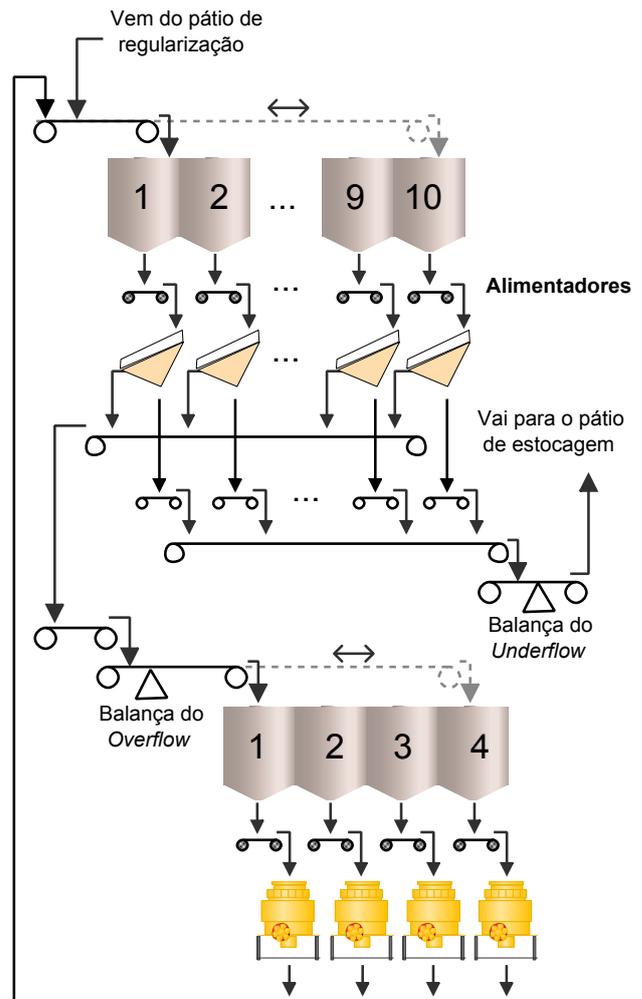


Figura 1. Fluxograma do Peneiramento Secundário e da Britagem Terciária de S11D.

tadores cônicos sempre cheias, mas sem transbordar. Por fim, o material que é britado, chamado de carga circulante, retorna para o peneiramento secundário, onde passa por nova classificação, podendo seguir para o pátio de produto ou passar pela britagem novamente. As balanças citadas estão instaladas nas correias transportadoras e medem o fluxo de material transportado, indicando a vazão mássica instantânea em t/h.

Com relação à velocidades dos alimentadores, existe uma restrição operacional para que seus valores sejam limitados entre 30% e 100% da velocidade máxima permitida. Além disso, todos os dez alimentadores são manipulados pelo mesmo controlador, isto é, todos atuam com as mesmas velocidades durante todo o tempo de operação. Outra característica da planta é a existência de um tempo considerável para que uma alteração de velocidade no alimentador cause uma alteração na taxa medida pelas balanças. Devido ao comprimento das correias e considerando sua operação com velocidades nominais, esse tempo é de aproximadamente 100 s para a balança do *underflow* e 140 s para a balança do *overflow*. Apesar de existirem outras restrições na planta, como a potência dos equipamentos, por questão de simplicidade, apenas as condições citadas anteriormente serão consideradas na simulação apresentada nesse artigo.

A planta foi modelada no software IDEAS[®], da Andritz Automation, com sua representação se iniciando na correia transportadora com cabeça móvel que faz a distribuição de material nos silos do peneiramento secundário. As representações no simulador seguem a sequência do processo até as correias em que se encontram as balanças do *overflow* e do *underflow*. Dimensões, capacidade e velocidade das correias e alimentadores foram ajustadas no modelo, bem como as dimensões dos silos, baseando-se nos dados reais dos equipamentos. No simulador, não foram consideradas dinâmicas relacionadas aos *drives* dos motores dos alimentadores e correias ou à inércia desses equipamentos. A modelagem da função de classificação da peneira foi realizada utilizando dados de distribuição granulométrica obtidas dos equipamentos da área. A comunicação com o software em que as lógicas de controle serão projetadas ocorre via OPC (*Object Linking and Embedding for Process Control*).

3. SOLUÇÃO POR CONTROLE BASEADO EM REGRAS

O método utilizado pela usina para controle da velocidade dos alimentadores do peneiramento secundário é baseado em regras. Essas regras foram criadas para manter a taxa das correias do *underflow* e do *overflow* das peneiras dentro de limites considerados adequados para permitir um melhor aproveitamento da capacidade das correias. Visto que o material que chega ao peneiramento secundário sofre variação de sua granulometria devido a alterações da alimentação nova ou da carga circulante, a classificação pode levar alguma das correias citadas a atingir seu limite de capacidade em diferentes momentos. Nessa situação, pode ser necessário corrigir a velocidade dos alimentadores para reduzir a taxa e a manter na faixa adequada de trabalho, sendo que aquela correia que necessitar de uma maior redução é a que prevalecerá no controle.

O Algoritmo 1 apresenta o sistema utilizado na usina. Os limites da faixa de trabalho são definidos baseando-se na capacidade máxima das correias e são chamados de Limite Superior de Controle (*LSC*) e Limite Inferior de Controle (*LIC*). Quando a taxa atual de qualquer uma das correias está fora de sua respectiva faixa de trabalho, um novo fator de correção da velocidade dos alimentadores é calculado pela divisão entre o limite mais próximo da taxa atual e a própria taxa atual. Para evitar que as correções levem a uma alteração brusca de velocidade, esses fatores são restringidos por um Limite Máximo de Fator (*LMaxF*) e um Limite Mínimo de Fator (*LMinF*). Após um cálculo de fator, um pulso de correção com duração de dois segundos é habilitado. Com isso, o *set-point* de velocidade será corrigido apenas na borda de subida desse pulso. A correção do controlador é então bloqueada para aquela correia e um novo cálculo de fator só ocorre após passado um Tempo de Espera de Correção (*TEC*). Os valores de *TEC* são maiores que o tempo necessário para que o material saia do silo e chegue às balanças, evitando chaveamentos frequentes e que várias alterações na velocidade sejam realizadas antes que seus efeitos sejam sentidos nas medições de taxa. Os fatores retornados pelo Algoritmo 1 são multiplicados pela velocidade atual do alimentador, de forma a encontrar as velocidades necessárias para que cada uma das correias retorne para sua faixa de trabalho. No instante em que há um pulso de correção habilitado, o

set-point de velocidade é atualizado como sendo a menor entre essas velocidades necessárias (limitado entre 30% e 100%), garantindo que prevaleça a correia que precise de maior redução da velocidade do alimentador. A Tabela 1 traz os parâmetros considerados para as regras do sistema em cada uma das correias. O controlador foi implementado no software MATLAB[®], realizando comunicação via OPC com o software IDEAS[®], onde os equipamentos da usina foram modelados.

Algoritmo 1 Cálculo de fator de correção

Entrada: taxa atual, *LSC*, *LIC*, *LMaxF*, *LMinF*, *TEC*

Saída: novo fator, pulso de correção

Inicialização :

1: controlador liberado

2: novo fator $\leftarrow 1$

3: correção não iniciada

4: pulso de correção desabilitado

Laço de Repetição :

5: **enquanto** simulação está sendo executada **faça**

6: **se** o controlador está liberado **então**

7: **se** taxa atual $> LSC$ **então**

8: novo fator $\leftarrow LSC / \text{taxa atual}$

9: iniciar correção

10: **senão se** taxa atual $< LIC$ **então**

11: novo fator $\leftarrow LIC / \text{taxa atual}$

12: iniciar correção

13: **fim se**

14: **se** novo fator $> LMaxF$ **então**

15: novo fator $\leftarrow LMaxF$

16: **senão se** novo fator $< LMinF$ **então**

17: novo fator $\leftarrow LMinF$

18: **fim se**

19: **se** a correção foi iniciada **então**

20: habilitar pulso de correção

21: bloquear controlador

22: iniciar contagem de tempo

23: **fim se**

24: **senão**

25: **se** a correção foi iniciada **então**

26: **se** tempo decorrido > 2 segundos **então**

27: desabilitar pulso de correção

28: **fim se**

29: **se** tempo decorrido $> TEC$ **então**

30: finalizar correção

31: liberar controlador

32: **fim se**

33: **fim se**

34: **retorna** novo fator

35: **retorna** pulso de correção

36: **fim se**

37: **fim enquanto**

Tabela 1. Parâmetros para o controle baseado em regras.

Parâmetro	<i>Underflow</i>	<i>Overflow</i>
<i>LSC</i> (t/h)	5600	2600
<i>LIC</i> (t/h)	4500	2100
<i>LMaxF</i>	1,05	1,3
<i>LMinF</i>	0,3	0,3
<i>TEC</i> (s)	130	360

4. SOLUÇÃO POR CONTROLE EM *VERRIDE*

A solução proposta neste trabalho utiliza controle em *override* ou com restrições, como apresentado na Figura 2. Esse tipo de controle apresenta a vantagem de, quando há menos variáveis a serem manipuladas que variáveis a serem controladas, permitir controlar uma variável até que a outra atinja seu valor máximo permitido, momento esse em que esta restrição é ativada e a outra variável deixa de ser controlada (Campos e Teixeira, 2010). Com isso, a planta continua em operação dentro das condições de segurança.

Foram projetados dois controladores do tipo PI, sendo um associado à correia do *underflow* e outro associado à correia do *overflow*. O controlador recebe a taxa da correia como variável de processo e utiliza o *LSC*, o mesmo valor da solução baseada em regras, como referência a ser buscada. O menor valor entre as saídas dos dois controladores é utilizado como variável manipulada, isto é, a velocidade do alimentador. O ganho proporcional (K_P), o ganho integrativo (K_I) e o *set-point* (SP), utilizados para cada controlador estão definidos na Tabela 2. Os parâmetros K_I e K_P foram sintonizados utilizando a *toolbox* PID Tuner do software MATLAB®, buscando reduzir o sobressinal e o tempo de acomodação das taxas de material nas correias após a aplicação de uma alteração em degrau no SP de taxa das correias. Utilizando o conceito de simulação *hardware-in-the-loop*, o controlador foi implementado no software Compact Control Builder®, da ABB, para execução em hardware, o Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) 800xA, também da ABB, comunicando-se com o software IDEAS®.

Tabela 2. Parâmetros para o controle em *override*.

Parâmetro	<i>Underflow</i>	<i>Overflow</i>
SP (t/h)	5600	2600
K_P	0,0048	0,0127
K_I	1,3535e-04	4,0057e-04

5. RESULTADOS

Os resultados serão apresentados em duas partes: na primeira com os dados simulados e na segunda com os dados da aplicação na planta real.

5.1 Resultados da aplicação em simulador

Como mencionado na introdução, o que se busca na indústria mineral é aproveitar ao máximo a capacidade de seus equipamentos. Diante disso, essa pesquisa buscou comparar o método de controle utilizado atualmente na usina de S11D com uma nova proposta, aplicando os dois controladores às mesmas condições. Com os equipamentos de interesse modelados no software IDEAS®, definiu-se uma taxa de alimentação fixa de 8200 t/h para os silos do peneiramento secundário. Essa taxa representa a soma do material vindo da pilha de regularização com o material recirculado, vindo da britagem terciária. As condições iniciais da simulação são todos alimentadores com 30% da velocidade e material já presente em ambas balanças. Como distúrbio ao sistema, aplicou-se uma variação na

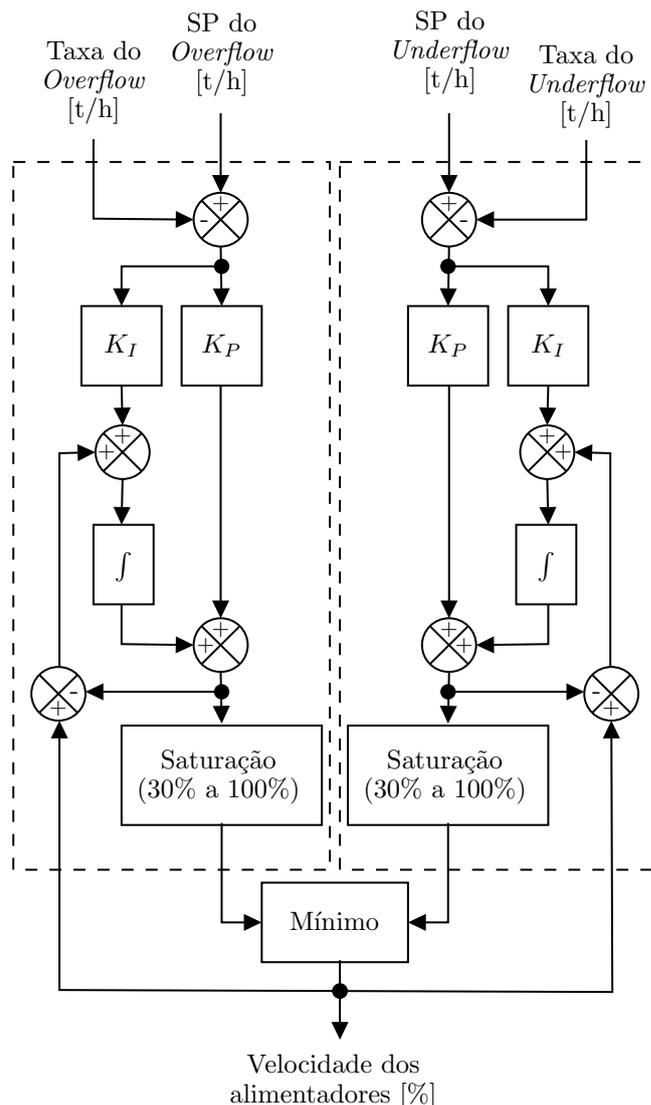


Figura 2. Fluxograma do controle em *override* utilizado (Controlador PI para o *overflow* à esquerda e para o *underflow* à direita).

granulometria do material da alimentação, sendo que a cada 2,22 horas o d_{80} do material alterna entre 25,4 mm e 6,2 mm. O d_{80} é o diâmetro no qual 80% do material é passante caso seja colocado em uma peneira de abertura igual ao diâmetro mencionado. Esta porcentagem foi escolhida como representativa para a distribuição granulométrica por ser o valor frequentemente utilizado para comparação. Fora isso, não há nada de especial com relação a utilizar especificamente 80%. Dessa forma, simulou-se instantes em que o material possui mais e menos finos, representando situações em que a granulometria do material vindo da pilha de regularização se altera ou, ainda, alterações do material recirculado provocadas por mudanças na abertura dos britadores cônicos ou desgastes em seu revestimento e alterações na eficiência do peneiramento, que podem modificar a quantidade de finos direcionados à britagem terciária.

As Figuras 3 e 4 ilustram o comportamento da taxa de material nas correias do *underflow* e do *overflow*, respectivamente. Como esperado, observa-se um comportamento

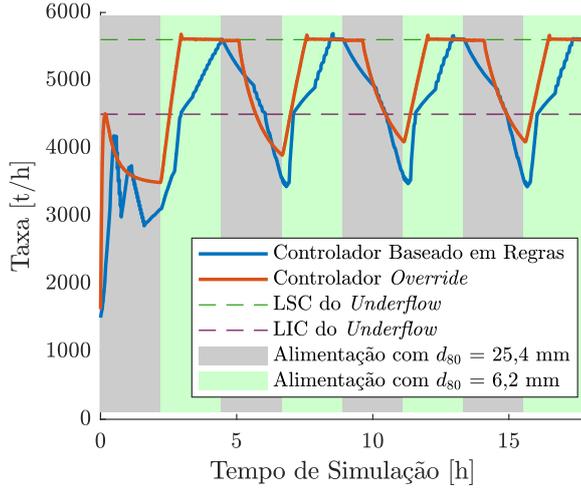


Figura 3. Comparação de resultados para o *underflow*.

mais suave de ambas as taxas quando aplicado o controle em *override*. Além disso, com o controlador baseado em regras, são poucos os momentos em que as taxas se aproximam de seus valores máximos, sendo o contrário do que ocorre com o controle em *override*, já que, com esse controlador, praticamente durante toda a simulação uma das duas correias estava com sua taxa acompanhando o valor do LSC. Como os controladores atuam ajustando a velocidade do alimentador, isto é, ajustando a taxa de entrada de material na peneira, uma redução de velocidade devido à restrição de uma das correias implica em redução de taxa em ambas correias. Dessa forma, na situação em que uma das correias está restringida por taxa, a outra poderá atingir valores menores que o LIC utilizado pelo Controlador Baseado em Regras, sem que isso seja considerado falha do controlador. Durante toda a simulação, em que alterações no d_{80} da alimentação foram utilizadas como distúrbio ao processo, o maior valor de taxa de *overflow* atingido foi de 2729 t/h, o que equivale a uma ultrapassagem de 4,96% do valor do *set-point* definido. Com relação à taxa de *underflow*, o pico máximo foi de 5680 t/h, isto é, uma ultrapassagem de 1,43% de seu *set-point*. Estes valores mostram que o controlador projetado foi capaz de proteger os equipamentos, de forma que os valores de taxa que ultrapassaram a referência são pequenos o suficiente para serem considerados irrelevantes.

Em S11D, o *underflow* do peneiramento secundário já é considerado o produto final da usina, não sendo necessário passar por outras etapas de beneficiamento. Buscando comparar, portanto, as taxas de produto final obtidas quando utilizando os dois controladores, a Figura 5 apresenta um boxplot das taxas de *underflow*. Nota-se que o controle em *override* elevou a mediana da taxa em 10,11% e diminuiu o desvio padrão em 12,62%.

Por fim, na Figura 6 é feita a comparação da variável manipulada pelos controladores, isto é, a velocidade dos alimentadores das peneiras. Como esperado, o controle em *override* elevou a velocidade média dos alimentadores, o que resultou no aumento de taxa já apresentado. Nota-se que, nos instantes iniciais, a velocidade apresentou maior aumento em relação ao controle baseado por regras, porém ainda distante de atingir os 100% da velocidade permitida.

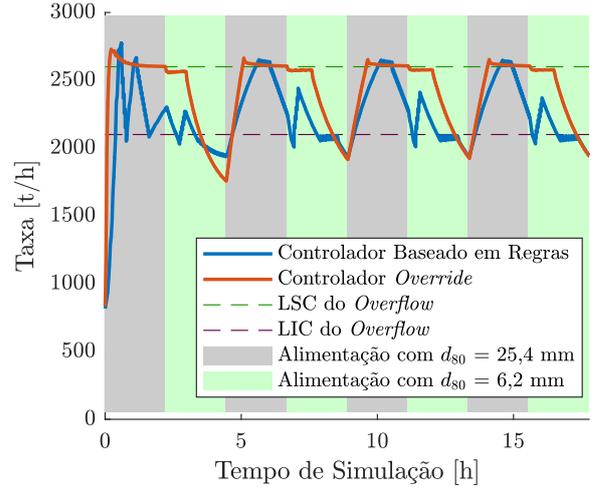


Figura 4. Comparação de resultados para o *overflow*.

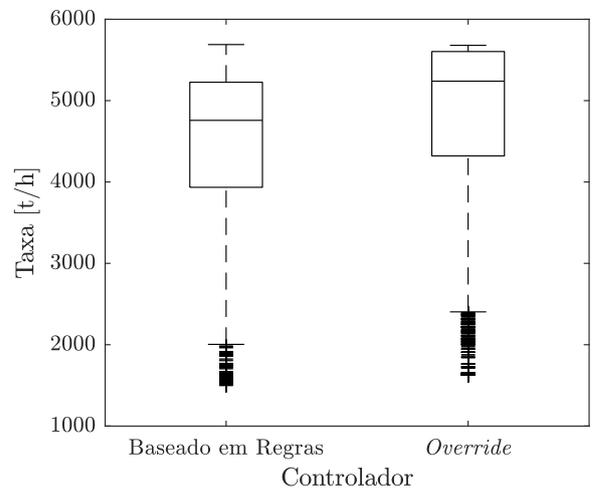


Figura 5. Boxplot para as taxas de *underflow*.

Outra análise realizada foi o cálculo da soma da diferença absoluta entre amostras consecutivas (*Sum of absolute Input Increments - SII*) para cada controlador a partir do momento que o sistema entra em regime. Para $u(k)$ sendo a amostra k do vetor de velocidade e T o número total de amostras, o *SII* pode ser calculado como mostrado em (1).

$$SII = \sum_{k=1}^{T-1} |u(k+1) - u(k)| \quad (1)$$

Considerando o sistema em regime após seis horas de simulação, o controlador em *override* apresentou um *SII* 6,1% menor, indicando um comportamento mais suave da variável manipulada ao utilizar esse controlador.

5.2 Resultados da aplicação real em S11D

A partir dos resultados satisfatórios encontrados nas simulações, foi realizada a troca do controlador para a taxa de *overflow* da planta real de S11D. Na mesma época, foram realizadas também alterações em restrições relacionadas

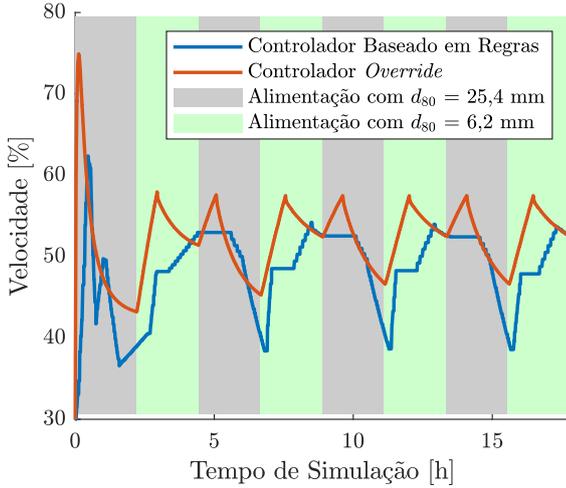


Figura 6. Comparação de resultados de velocidades dos alimentadores.

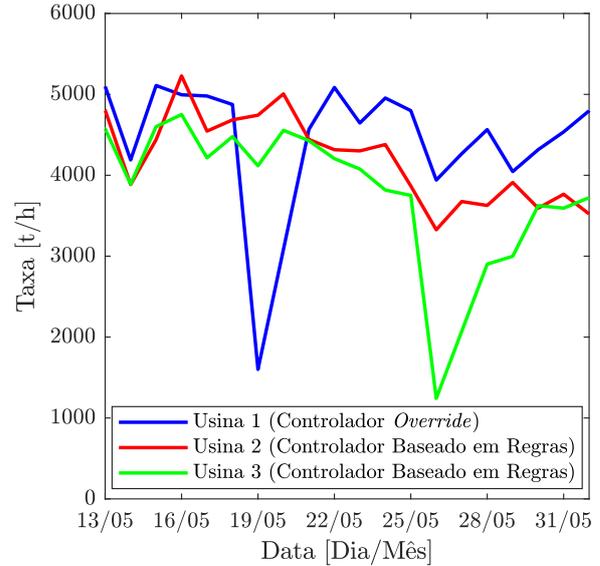


Figura 8. Comparação de produção nas três usinas de S11D.

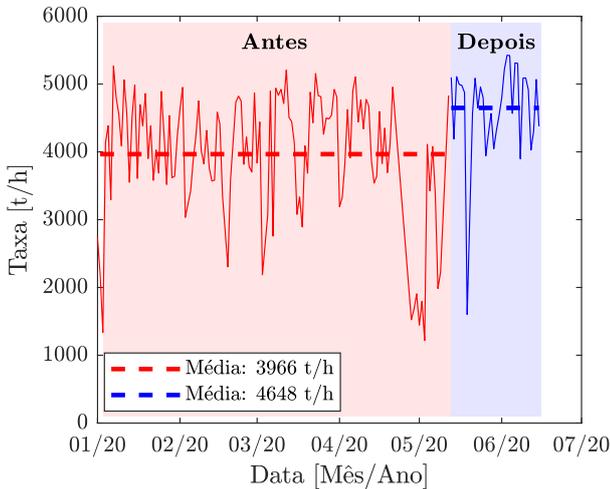


Figura 7. Produção real na Usina 1 de S11D.

a taxas de saída da usina, nível da área de britagem terciária e taxa de carga circulante. No sistema real é levado em conta as restrições por potência de equipamentos, capacidades dos circuitos anteriores e posteriores ao peneiramento secundário, bem como taxas de referência definidas pelos operadores. Dessa forma, a velocidade dos alimentadores não é definida somente pelo controlador de taxa de *overflow* e, portanto, é esperado que a taxa medida apresente variação considerável e mantenha certa distância de seu valor de LSC, ao contrário do que ocorreu nas simulações. Outro ponto a se considerar é que, durante os testes reais, a granulometria do material sofre alterações com maior frequência que a simulada.

A Figura 7 apresenta a taxa média diária de material produzido antes (entre 01/01/2020 e 12/05/2020) e depois (entre 13/05/2020 e 15/06/2020) das alterações realizadas. Comparando os períodos, é possível ver um aumento de aproximadamente 17,2% na média da taxa de material e uma redução de 24,2% no desvio padrão, chegando a 703,8 t/h após a aplicação da nova estratégia de controle.

Em S11D existem três circuitos de peneiramento secundário e britagem terciária com as mesmas características. Os resultados apresentados na Figura 7 são o do conjunto chamado de Usina 1. Os três conjuntos recebem material de um mesmo circuito de peneiramento primário e britagem secundária e, dessa forma, qualquer variação nas características do material de entrada é sentida pelos três conjuntos ao mesmo tempo. Inicialmente, a troca do controlador foi realizada apenas na Usina 1, permitindo comparar com as taxas medidas nas Usinas 2 e 3 e verificar os efeitos dessa troca. A Figura 8 apresenta a taxa nas Usinas 1, 2 e 3 para o período entre 13/05/2020 e 01/06/2020, isto é, período após as alterações realizadas na Usina 1 e ainda com o controlador baseado em regras nas Usinas 2 e 3. Nota-se que a Usina 1 com a aplicação do controle em *override* produziu mais que as demais usinas na maior parte dos dias analisados, sendo que as taxas médias do período analisado das Usinas 1, 2 e 3 foram, respectivamente, 4493 t/h, 4203 t/h e 3871 t/h.

Com os resultados satisfatórios na aplicação real da Usina 1, as alterações foram replicadas dias depois nas Usinas 2 e 3. Infelizmente os resultados para estas usinas ainda não estavam disponíveis em quantidade suficiente no momento da preparação deste artigo.

6. CONCLUSÃO

Uma opção para substituição do método de controle até então usado na usina foi apresentada nesse artigo. Em comparação com o método existente baseado em regras, o controlador em *override* proposto apresentou melhor aproveitamento da capacidade das correias transportadoras nas simulações, aumentando inclusive a taxa de produção e levando a alterações mais suaves nas taxas medidas em cada uma das correias. O método proposto também foi aplicado na usina real e levou a melhorias semelhantes. Ainda que os resultados obtidos com o controlador PI foram satisfatórios, trabalhos futuros poderão considerar a utilização de um Preditor de Smith ou outras técnicas

recomendadas para plantas com atrasos de transporte significativos. Além disso, a simulação poderá ser incrementada com a modelagem das áreas de britagem terciária e britagem secundária, que influenciam no material que alimenta o peneiramento secundário.

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), números 402759/2018-4 e 444425/2018-7; da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); do Instituto Tecnológico Vale (ITV); da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e da Vale S.A.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, K., Silva, H., Teodoro, E., Fonseca, A., Garioli, G., Lopes Júnior, Ê., Cota, L., e Euzébio, T. (2019). Averaging level control of bulk solid material using a tripper car. *IFAC-PapersOnLine*, 52(14), 147 – 152. doi:10.1016/j.ifacol.2019.09.179.
- Campos, M. e Teixeira, H. (2010). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. Editora Blucher.
- Chen, X.s., Zhai, J.y., Li, S.h., e Li, Q. (2007). Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. *Minerals Engineering*, 20(11), 1099 – 1108. doi:10.1016/j.mineng.2007.04.007.
- Euzébio, T., Yamashita, A., Pinto, T., e Barros, P. (2020). SISO approaches for linear programming based methods for tuning decentralized PID controllers. *Journal of Process Control*, 94C, 75–96. doi:10.1016/j.jprocont.2020.08.004.
- Forsman, K. (2016). Implementation of advanced control in the process industry without the use of MPC. *IFAC-PapersOnLine*, 49(7), 514–519. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.394.
- Hodouin, D., Jämsä-Jounela, S.L., Carvalho, M., e Bergh, L. (2001). State of the art and challenges in mineral processing control. *Control Engineering Practice*, 9(9), 995 – 1005. doi:10.1016/S0967-0661(01)00088-0.
- Moreira, V.d.S. e Euzébio, T.A.M. (2018). Modelagem e controle de abertura de câmara de britadores cônicos. In *Proceedings of the XXII Congresso Brasileiro de Automática. Joao Pessoa, Paraíba.*, volume 10. doi:10.20906/CPS/CBA2018-1402.
- Olivier, L.E. e Craig, I.K. (2017). A survey on the degree of automation in the mineral processing industry. In *2017 IEEE AFRICON*, 404 – 409. IEEE. doi:10.1109/AFRCON.2017.8095516.
- Reis, L., Lopes Júnior, Ê., e Euzébio, T. (2018). Hardware-in-the-loop testing platform of a predictive controller applied to a simulated regrinding circuit. In *6th International Congress on Automation in Mining. GECAMIN*.
- Van Drunick, B. et al. (2005). Expert mill control at anglogold ashanti. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 105(7), 497 – 506. doi:10520/AJA0038223X_3000.