

Controle de Nível da Câmara em Britador Cônico

Patrícia G. M. Meireles*, Thiago A. M. Euzébio***, Márcio F. Braga***

*Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG, Brasil (e-mail: patmeireles13@hotmail.com).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto — UFOP, 35931-008, João Monlevade, MG, Brasil (e-mail: mfbraga@ufop.edu.br)

*** Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG, Brasil (e-mail: thiago.euzebio@itv.org)

Abstract: The crushing operation plays an important role for the mining industry. Achieving optimal performance from the plant and discovering its bottlenecks are some of the targets. The increase in the efficiency of the crusher can occur as the level of the crusher's cavity is increased. Thus, the objective of this work is to develop a control system for the feed hopper level. This is a common occurrence in the industry, as crushers operate with level below what is desirable, causing productivity problems. In order to achieve such control, parameters of level, variation rate of input and output of the crusher and, consequently, the speed of the belt feeder and regulation of the closed side setting (CSS) were used as a process and manipulated variables, in order to maximize the production efficiency. State estimators were also used to filter out noise during the measurement and to estimate values in case of sensor measurement failure.

Resumo: A operação de britagem desempenha um importante papel para a indústria de mineração. Obter o desempenho ótimo e descobrir os pontos de estrangulamento da planta são alguns dos alvos. O aumento na eficiência do britador ocorre à medida que o nível da cavidade de britagem é aumentado. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle para o nível da câmara do britador. Trata-se de uma ocorrência comum na indústria, os britadores funcionarem com o nível dos silos abaixo do desejado, acarretando problemas de produtividade. Para o controle foi utilizado como base de dados o nível, a taxa de variação de entrada e a saída do britador e, conseqüentemente, a velocidade do alimentador de correia e a regulagem da abertura da posição fechada (APF), visando maximizar a eficiência da produção. Foram empregados também estimadores de estados para filtrar ruídos na medição e para estimar valores em caso de falha da medição pelo sensor.

Keywords: Crusher; Level Control; Crusher Cavity; CSS; State Estimator.

Palavras-chaves: Britador; Controle de Nível; Câmara do britador; APF; Estimador de Estado.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria de mineração, um dos principais objetivos é a obtenção do melhor retorno possível sobre seus ativos a partir de custos mais baixos em sua produtividade. Nesse tipo de operação, cuja planta e equipamentos funcionam ininterruptamente, é importante o bom desempenho, bem como a sua manutenção. Nessa perspectiva, a tecnologia auxilia esse segmento da indústria a propiciar meios para uma gestão da manutenção e da produção de maneira eficaz (Sachs, 2009).

Sabe-se que um dos equipamentos essenciais para o setor de mineração são os britadores. A operação de britagem consiste na redução do tamanho das partículas minerais e sofre a exigência de evitar a geração de quantidade excessiva de finos e de controlar o tamanho máximo dos produtos (King, 2012; Itävuo et al, 2013).

Para analisar e descrever as operações básicas de um britador, estudos recentes, como em Atta et al. (2013), aplicam o

princípio da divisão do equipamento em zonas. Cada zona é considerada como um estágio único que tem entrada e saída e, em seu interior, as partículas sofrem as ações de quebra, seleção e classificação. Pode-se dizer, no geral, que o desempenho dos britadores é a combinação e repetição dessas ações (Atta et al., 2013). Antes que o tamanho desejado seja atendido, o material de alimentação sofre de dois a quatro estágios de britagem que formam um circuito (Itävuo et al., 2013).

No britador cônico, a britagem ocorre na cavidade chamada câmara. A câmara se forma entre o manto e o côncavo (Atta et al., 2013), como pode ser observado na Fig. 1. Segundo Jacobson et al. (2010), conforme o nível do material ultrapassa o topo da câmara, a ação de esmagamento é aumentada e, conseqüentemente, há o aumento na eficiência de produção. Na Fig. 2, podem ser observados três diferentes níveis na cavidade. A distância entre o côncavo e o manto, medido na parte mais estreita do equipamento, é chamada de Abertura da Posição Fechada (APF). A distância mais estreita é

normalmente na saída da câmara de britagem. Esse é o parâmetro de controle mais usado para ajustar o produto do britador (Hulthén, 2010), com a finalidade de obter o desempenho ótimo da planta.



Fig 1. Princípio de um britador cônico. Fonte: Hulthén (2010).

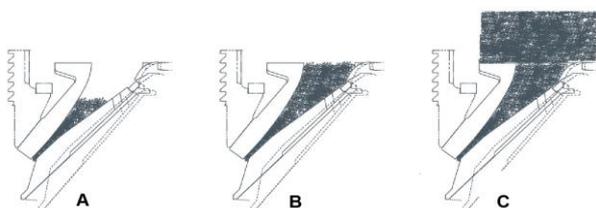


Fig 2. Níveis de material dentro da cavidade. A: Meia cavidade; B: Cavidade cheia; C: Cavidade super cheia. Fonte: Adaptado de Jacobson et al. (2010).

Diminuindo a APF do britador, consegue-se diminuir a carga circulante em um processo de britagem e melhorar a produtividade, uma vez que o aumento da carga circulante causa a redução da taxa de alimentação e sobrecargas em equipamentos. Por meio de dados coletados em experimento realizado na Usina de Serra Leste e os utilizados em simulações, confirmou-se a afirmação acima, pois na saída do britador secundário com APF ajustada para 35 mm a quantidade de carga circulante, ou seja, o *oversize*, foi apenas 32,88%, contra 48,81% com APF de 38 mm e 54,05% com APF regulada para 41 mm (Moreira e Euzébio, 2018). Materiais de baixo *work index* (wi), ou seja, que necessitam de menos energia para se quebrar, britam mais facilmente, com isso, o nível do britador esvazia mais rapidamente e a carga circulante que passa por ele é menor. Fica evidente, portanto, que é essencial fazer o controle do nível da câmara do britador para que se maximize a eficiência de produção e pode-se conseguir isso utilizando o controle da APF.

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle para o nível da câmara do britador. A estratégia proposta poderá ser empregada em plantas que apresentam problemas na britagem secundária, como, por exemplo, um conjunto de britadores que funcionam com o nível dos silos abaixo do desejado, acarretando problemas de produtividade. Para o controle, utiliza-se como base de dados o nível, a taxa de variação de entrada e a saída do britador e, consequentemente, a velocidade do alimentador de correia e a regulagem da APF, visando maximizar a eficiência da produção. Empregam-se os *softwares* MATLAB/Simulink® e Ideas® da Andritz para simular as estratégias de controle

propostas e a planta de britagem, respectivamente. Com isso, foi possível efetuar e analisar inúmeros testes de controle na planta, como estratégias de controle que empregam estimadores de estado, com câmara cheia, podendo assegurar o rendimento máximo de uma determinada granulometria necessária no produto final.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é apresentada a modelagem de um circuito simples de britagem para o controle de nível de britadores cônicos. Na Seção 3, são mostradas as estratégias de controle de nível empregadas, como a utilização de estimadores de estados, que são descritas posteriormente. Na Seção 4, exibe-se o resultado das estratégias de controle utilizadas para o britador empregado neste trabalho, como, sistema de controle SISO (do inglês, Single Input Single Output), multivariável, além de estimadores de estado. Por fim, na Seção 5, conclui-se o artigo.

2. TEORIA

2.1 Modelo da planta

Considerando a área do silo de alimentação do britador como a variável A , a altura do silo de alimentação como h , o tempo como t e a densidade do material como ρ , a massa presente no silo de alimentação do britador, conforme ilustrado na Fig. 3, e o balanço de massa são dados, respectivamente, por

$$m(t) = Ah(t)\rho, \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t), \quad (2)$$

em que q_{in} é o fluxo de massa de entrada no silo e q_{out} é o fluxo de massa de saída da câmara.

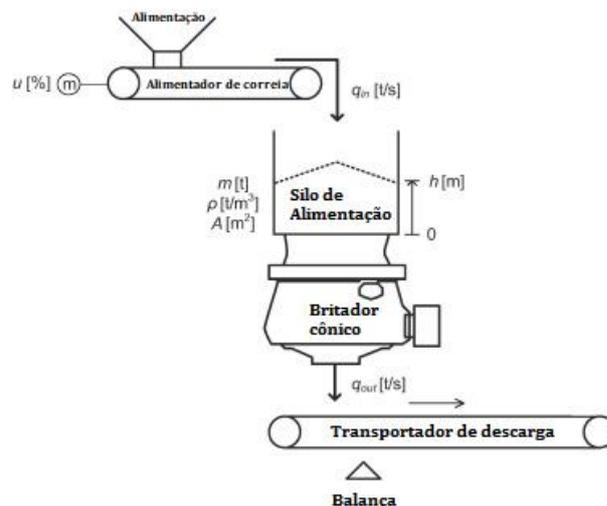


Fig. 3: Sistema do controle de nível do britador cônico. Fonte: Adaptado de Itävuo et al., 2017.

Segundo Itävuo et al. (2017), ao assumir a correia como um alimentador linear, sem atrasos e com dinâmica rápida, a massa de fluxo q_{in} pode ser aproximada por

$$q_{in}(t) \approx \eta_1 u_1(t), \quad (3)$$

na qual $u_1(t)$ é a entrada de controle do alimentador de correia e η_1 é o ganho do alimentador. Rearranjando e substituindo (1) e (3) em (2), tem-se

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A\rho} (\eta_1 u_1(t) - q_{out}(t)). \quad (4)$$

Ainda, segundo Itävuo et al. (2017), se considerar que q_{out} varia lentamente, tem-se que

$$\frac{dq_{out}}{dt} = 0 \quad (5)$$

Assim, definindo-se o vetor de estados como

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(t) \\ q_{out}(t) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

obtém-se, finalmente, as equações de espaço de estados em tempo contínuo e a de medição, as quais são dadas, respectivamente, por

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_c} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_1 \\ A\rho \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_c} u(t), \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_c} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

em que A_c é a matriz da dinâmica do sistema, B_c é a matriz de entradas e C_c é a matriz de saídas.

Um sistema em espaço de estados discreto LTI, que pode ser, por exemplo, oriundo da discretização de um sistema contínuo, com entradas aditivas para ruído de processo w e ruído de sensor v pode ser descrito como

$$x(t_{k+1}) = A_d x(t_k) + B_d u(t_k) + Nw(t_k), \quad (9)$$

$$y(t_k) = C_d x(t_k) + v(t_k), \quad (10)$$

em que $u(t)$ é o vetor de entrada, $x(t)$ é o vetor de estado não medido, $y(t)$ é o vetor de saída medido, A_d é a matriz da dinâmica do sistema, B_d é a matriz de entrada, C_d é a matriz de saída, N é a matriz de distribuição da entrada de distúrbio, t_k é o instante de tempo atual e t_{k+1} é o instante de tempo subsequente.

2.2 Estimadores de estado

Um estimador de estado é uma ferramenta usada para filtrar sinais e estimar estados de processos não medidos ou não disponíveis de um sistema real com o intuito de minimizar o erro entre o estado verdadeiro e o estimado (Itävuo et al., 2017). Em Itävuo et al. (2017), utilizou-se um estimador de estado para controlar o nível do silo de alimentação de um britador cônico. Os testes foram realizados em grande escala e, segundo os autores, os benefícios do controle incluem a possibilidade de recuperar sinais de medição perdidos

temporariamente, além de ter um controle de nível mais consistente e com menor esforço do controlador.

2.3 Representação de estimador de estados no tempo discreto

Um estimador de estado corretor-preditor discreto baseado em medições (estimador atual) é descrito por (Phillips e Nagle, 1995)

$$\hat{x}(t_k|t_k) = \bar{x}(t_k|t_{k-1}) + L(y(t_k) - C_d \bar{x}(t_k|t_{k-1})), \quad (11)$$

$$\bar{x}(t_k|t_{k-1}) = A_d \hat{x}(t_{k-1}|t_{k-1}) + B_d u(t_{k-1}), \quad (12)$$

em que L é a matriz de ganho do estimador, $\hat{x}(t_k|t_k)$ é a estimativa do estado posterior corrigido no tempo t_k após a medição $y(t_k)$ e $\bar{x}(t_k|t_{k-1})$ é a estimativa do estado previsto *a priori* com base na estimativa do estado anterior e as entradas de controle até t_{k-1} . O valor de L é uma troca entre a taxa de decaimento do estimador e a sensibilidade a distúrbios de medição.

Empregando o procedimento de discretização por segurador de ordem zero – SOZ (ou do inglês ZOH) (Phillips e Nagle, 1995), obtém-se o modelo em espaço de estados no tempo discreto para o modelo contínuo (7) e (8), dado por

$$\begin{bmatrix} x_1(t_{k+1}) \\ x_2(t_{k+1}) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{A_d} \begin{bmatrix} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_1 \Delta t \\ A\rho \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_d} u_1(t_k), \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t_k) \\ y_2(t_k) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_d} \begin{bmatrix} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

em que Δt é o tempo diferencial entre o intervalo de t_k e t_{k+1} , ou seja, é o período de amostragem T utilizado na discretização do modelo, uma vez que se utiliza um intervalo constante entre as amostras coletadas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Validação do britador secundário HP400 no software Ideas®

Desenvolvendo e empregando um controlador adequado à planta do processo, consequentemente a sua eficiência de produção aumentará. Porém, antes de projetar o controlador, é necessário que o modelo da planta projetada na simulação represente a dinâmica real do processo com fidelidade. Com isso, foi necessário validar um britador no *software* Ideas®, de modo que sua dinâmica se assemelhasse ao britador Metso HP400, utilizado na Usina de Serra Leste, local onde coletou-se os dados. Porém destaca-se que a técnica desenvolvida é aplicável a outros modelos. Para isso, foi utilizada a mesma metodologia de validação empregada em Meireles et al, 2018.

3.2 Controle e estimação do nível de um britador cônico utilizando a velocidade do alimentador

Problemas na britagem, como o fato dos britadores funcionarem com o nível dos silos abaixo do desejado ou acima do permitido, acarreta queda de produtividade, sendo um problema muito comum nas usinas de mineração, como na Usina de Serra Leste. Assim um dos objetivos deste trabalho é desenvolver um sistema de controle e estimação de nível para britadores que melhore o seu desempenho.

De posse de um modelo validado do britador, o passo subsequente envolve o projeto de um controlador PI para o nível dos britadores secundários com referência (*setpoint*) em 80%, que teve como variável controlada, a velocidade do alimentador de correia, e como variável de processo, o nível do silo de alimentação do britador, que se localiza acima da câmara do britador. Foi escolhido esse valor de referência para assegurar o nível do silo de alimentação do britador em nível alto e, conseqüentemente, o nível da câmara em “supercheio”. Com tais escolhas, consegue-se gerar uma maior eficiência na britagem, em comparação com a câmara em nível médio.

Devido ao processo apresentar dinâmica integradora, usou-se o Método do Modelo Interno de Simples (SIMC) para sintonizar os parâmetros do controlador PI, P e I. A escolha do método dá-se em virtude do método SIMC reduzir o tempo integrativo (T_i) para melhorar a rejeição de distúrbios pelo sistema (Skogestad, 2003). Primeiramente, aplicou-se um degrau na entrada do modelo para encontrar o tempo morto θ e a constante de tempo τ do processo. Skogestad e Grimholt (2012) aconselha considerar $\tau_c = \theta$ para conseguir uma saída próxima ao valor desejado, sem perder robustez e suavidade. Ainda de acordo com Skogestad (2003), para uma resposta mais agressiva, considera-se $\tau_c = 0,5\theta$. Para essa sintonia, foi considerado $\tau_c = 0,5\theta$ e, com isso, os valores de P e I foram, respectivamente, 2 e 0,2628, de forma que o controlador é dado por

$$C(s) = P + I \frac{1}{s} = 2 + 0,26 \frac{1}{s}. \quad (15)$$

Na Fig. 4, exemplifica-se o sistema de controle desenvolvido no Simulink®, sendo denominado Circuito 1. O controlador PI foi configurado com os parâmetros mostrados em (15) e foi colocado um bloco de variáveis aleatórias para reproduzir o ruído de uma medição real. Utilizou-se um ruído gaussiano, que emite um sinal normalmente distribuído, com variância de 0,1. O período de amostragem utilizado é de 0,1s.

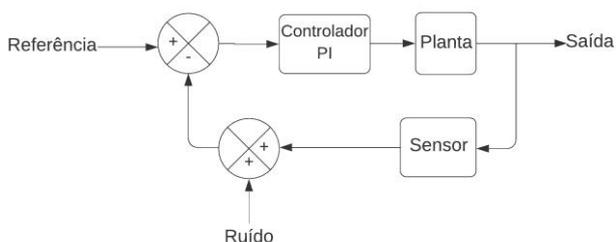


Figura 4: Diagrama de blocos do sistema de controle com um controlador PI (Circuito 1).

Após isso, foi projetado um estimador de estados no Simulink para estimar o nível do britador, com os seguintes parâmetros: $A = 3,9761 \text{ m}^2$, $h = 0,5 \text{ m}$ e $\rho = 4,8 \text{ t/m}^3$. Os parâmetros empregados foram do britador utilizado na fase da validação. O valor de η_1 , que corresponde ao ganho do alimentador e L_1 , a matriz de ganho do estimador não correlacionada, dado por Itävuo et al. (2017), inicialmente utilizados, foram, respectivamente $\eta_1 = 4,9 \text{ tph}/\%$ e $L_1 = \text{diag}(0,2; 0,3)$.

Segundo Itävuo et al. (2017), há a impossibilidade de determinar analiticamente a matriz de ganho do estimador, então a solução encontrada foi sintonizar por tentativa e erro. Isso foi devido à incapacidade de quantificar totalmente a covariância de ruído de processo w . Além disso, em Itävuo et al. (2017), recomenda-se que os elementos da diagonal secundária do ganho L_1 sejam nulos, porque a interação entre h e q_{out} é considerada insignificante, além de facilitar a implementação. Após alguns testes, a melhor resposta encontrada foi obtida empregando o valor de L_1 inicialmente utilizado na simulação, sendo necessário apenas ajustar η_1 para 0,95 $\text{tph}/\%$.

Nas Fig. 5 e 6, ilustram-se, respectivamente, o sistema de controle com estimador de estado desenvolvido no Simulink®, sendo denominado Circuito 2, e o bloco do estimador com mais detalhes. Assim como feito anteriormente, utilizou-se um ruído gaussiano com as mesmas configurações, ou seja, variância de 0,1. Ressalta-se que o modo de seleção da chave, ilustrado na Fig. 5, indica se o sistema está com o estimador de estado habilitado ou não.

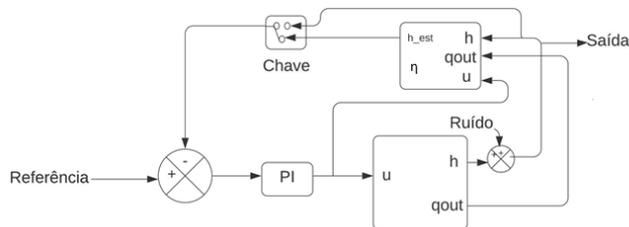


Fig 5: Diagrama de blocos do sistema de controle com um controlador PI e um estimador de estado desenvolvido no Simulink (Circuito 2).

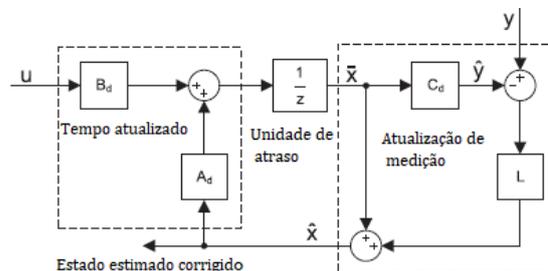


Fig 6: Diagrama de blocos do estimador de estado. Fonte: Adaptado de Itävuo et al. (2017)

3.3 Controle e estimação do nível do britador cônico utilizando a velocidade do alimentador e a APF

Após os dois testes para o controle de nível, o primeiro utilizando apenas um controlador PI e o segundo adicionando um estimador de estado, foi inserido mais uma variável manipulada, a APF.

Assim, foi projetado um controlador PI para o nível do britador com referência (*setpoint*) em 80% do nível máximo do silo de alimentação do britador, que teve como variável controlada a APF e, como variável de processo, o nível do britador. Utilizando igualmente o método SIMC e considerado também $\tau_c = 0,5\theta$, o controlador obtido, após alguns ajustes manuais, é dado por

$$C(s) = P + I \frac{1}{s} = 0,05 + 0,01 \frac{1}{s}. \quad (16)$$

a Fig. 7, ilustra-se o sistema com os controladores PI para cada MV, que são a velocidade do alimentador e a APF, além do estimador já inserido anteriormente, sendo denominado Circuito 3.

Por fim, foi inserido no circuito mais um estimador de estado, porém esse último utilizando a saída de controle da APF, sendo denominado Circuito 4. Na Fig. 8 ilustra-se esse sistema desenvolvido no Simulink® com os dois estimadores para cada variável manipulada.

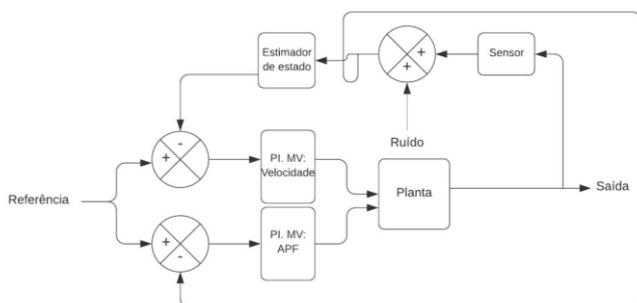


Fig. 7: Diagrama de blocos do sistema de controle com dois controladores PI e um estimador de estado (Circuito 3)

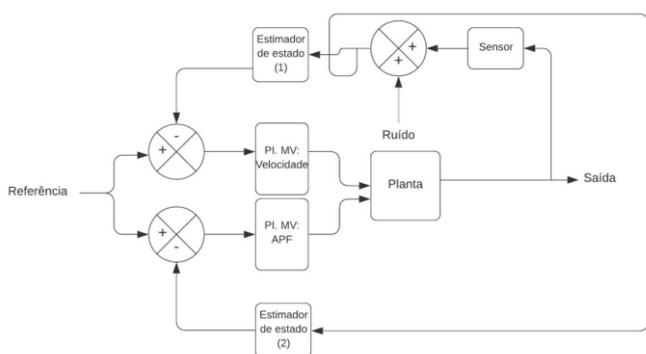


Fig. 8: Diagrama de blocos do sistema de controle com dois controladores PI e dois estimadores de estado (Circuito 4).

Para isso, foi necessário desenvolver uma nova modelagem para o circuito, pelo fato de não se ter encontrado na literatura. Então, fez-se

$$q_{out}(t) \approx \eta_2 u_2(t). \quad (17)$$

Rearranjando e substituindo (1) e (17) em (2), e considerando que $q_{in}(t)$ varia lentamente, assim $\frac{dq_{in}}{dt} = 0$, e que $q_{out}(t) = \eta_2 u_2(t)$, tem-se

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A\rho} (q_{in}(t) - \eta_2 u_2(t)).$$

Definindo como variáveis de estados h e q_{in} e empregando o procedimento de discretização por SOZ (Phillips e Nagle, 1995), previamente utilizado, obtém-se o modelo discreto dado por

$$\begin{bmatrix} x_1(t_{k+1}) \\ x_2(t_{k+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \eta_2 \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} u(t_k), \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t_k) \\ y_2(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

O valor de η_2 e de L_2 , para esse caso, também foram sintonizadas por tentativa e erro e tiveram como valores $\eta_2 = 40 \text{ tph}/\%$ e $L_1 = \text{diag}(0,6; 0,9)$. Os elementos da diagonal secundária de L_2 para essa modelagem também são nulos, devido à interação entre h e q_{in} ter sido considerada insignificante, além de facilitar a implementação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, exibem-se os resultados das estratégias de controle utilizadas para o britador empregado neste trabalho. Para conseguir representar de forma mais fidedigna a realidade de um circuito de britagem, nos testes, adicionou-se um ruído no sinal de medição do nível, diminuiu-se a taxa de alimentação do britador e variou-se a curva granulométrica do material britado.

4.1 Resultado do controle e da estimação do nível do britador cônico utilizando a velocidade do alimentador como variável manipulada

Na Fig. 9, o nível do silo do britador medido e o *setpoint* são representados, respectivamente, pelas linhas em azul e vermelho. Até o instante de tempo de 1000 segundos, o sistema estava sem estimador de estado, após esse período, foi habilitado o estimador. Reitera-se que, nos primeiros 400s, considerou-se que o sistema estava em regime transitório.

Com isso, pode-se verificar que a variável de processo, ou seja, o nível teve uma menor oscilação com o estimador de estado. O conjunto de dados da PV sem estimador teve o desvio padrão de 0,41 e com o estimador foi de apenas 0,09. Ressalta-se que quanto mais próximo de 0 for o desvio padrão mais homogêneo são os dados. O primeiro desvio padrão foi calculado considerando o tempo de 500s a 1000s, período no qual o sistema encontrava-se em regime permanente, e o segundo de 1500s a 2000s.

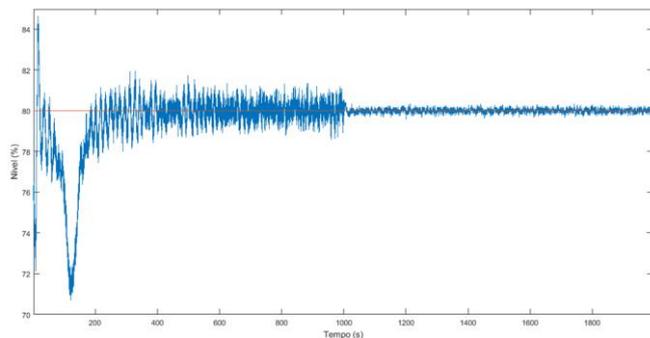


Fig. 9: Resposta do controlador PI sem estimador entre $t = 0s$ e $t = 1000s$ (Circuito 1), e com estimador entre $t = 1001s$ e $t = 2000s$ (Circuito 2), com uma MV.

Por meio da Fig. 10, pode-se verificar que a saída de controle com o controlador PI sem o estimador de estados tem variações maiores que a com estimador de estado, ou seja, no primeiro caso há um maior esforço do controlador para manter a variável de processo no *setpoint*, pelo motivo de não haver um filtro suavizando as medições ruidosas, como no segundo caso. O conjunto de dados da MV sem estimador teve o desvio padrão de 15,03 e com o estimador foi de apenas 1,19. A redução do esforço de controle é vantajosa pois reduz o esforço aplicado ao elemento final de controle prevenindo, por exemplo, a quebra do atuador por esforço repetitivo.

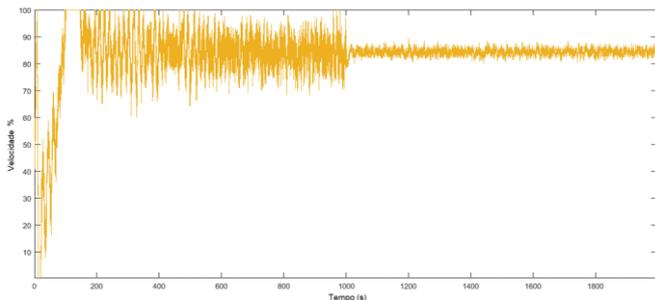


Fig. 10: Esforço do controlador sem estimador entre $t = 0s$ e $t = 1000s$ (Circuito 1), e com estimador entre $t = 1001s$ e $t = 2000s$ (Circuito 2), com uma MV.

A curva em vermelho é o nível real do silo do britador e, em azul, é a do nível estimado a qual está sob a linha em vermelho. A curva em preto é o nível medido pelo sensor. Nesse teste, a leitura do sensor foi perdida por cerca de 4 segundos no instante entre $t = 507s$ e $t = 511s$, e o estimador conseguiu manter o nível no valor desejado. Em seguida, novamente a leitura do sensor foi perdida, mas por um tempo em torno de 30s e o nível também conseguiu se manter no valor do SP. Apesar do controlador não receber o valor real do nível medido pelo sensor, o estimador conseguiu prever. No entanto, não é seguro dizer que essa situação possa ser sustentada por longo tempo. Por isso, em um novo teste, foi zerada novamente a leitura do sensor, com o intuito de descobrir por quanto tempo o estimador conseguiria manter o nível no valor desejado.

Para este circuito, foi testado também qual o comportamento do nível quando a leitura do sensor é perdida, por exemplo, quando ocorre um defeito no sensor, com o intuito de verificar a capacidade do estimador em estimar o nível (Fig. 11). Para

isso, os ganhos do estimador em relação à medição do nível (L_1 e L_2) foram considerados iguais a zero, uma vez que as medições obtidas são incorretas (Itävuo et al., 2017).

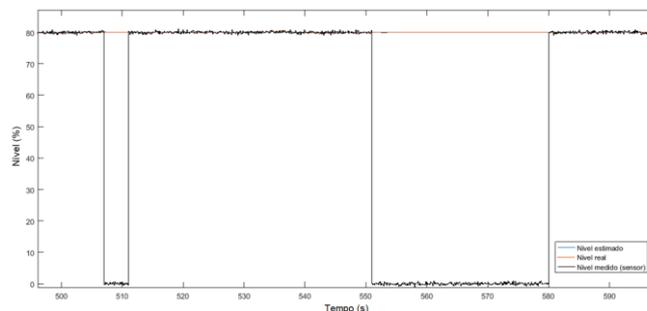


Fig. 11: Imagem ampliada do comportamento do nível no momento em que a leitura do sensor é perdida entre os instantes $t = 507s$ e $t = 511s$ e entre $t = 552s$ e $t = 580s$, com o nível estimado na tendência em azul, o nível real em vermelho e o nível do sensor em preto, Circuito 2.

O estimador de estados permaneceu em torno de 80% durante todo o teste e o nível real do silo do britador demorou mais de 8000 segundos, ou seja, mais de 2 horas, para alcançar o nível de 78,8%, ou seja, o decaimento foi lento. Isso pode ser explicado por meio de (11), que considera o $\hat{x}(t_k|t_k)$ igual ao $\bar{x}(t_k|t_{k-1})$ quando L_1 é zero. Porém, foi verificado que essa queda é lenta apenas quando o sistema está em equilíbrio e não há perturbação. Caso a granulometria do material britado sofra muitas mudanças, por exemplo, o controle do sistema é perdido. O valor de $\eta_1 = 0,95 \text{ tph}/\%$ foi considerado ideal para esse sistema, pois no momento em que se variou o parâmetro η_1 , o controle foi perdido também. Sem o estimador e sem a leitura do sensor, o nível do britador chega a 100% rapidamente, em torno de 50 segundos.

4.2 Resultado do controle e da estimação do nível do britador cônico utilizando a velocidade do alimentador e a APF como variáveis manipuladas

Nesse novo circuito foi utilizada mais uma variável manipulada, a APF. Foram realizadas duas simulações, a primeira com a APF sem estimador de estado (Fig. 7), Circuito 3, e a segunda com estimador (Fig. 8), Circuito 4, sendo que, nos dois testes, o estimador de estado que recebe o sinal da saída de controle da velocidade do alimentador ficou habilitado a todo o momento. O conjunto de dados da PV sem estimador teve o desvio padrão de 0,11 e com o estimador foi de 0,09. O primeiro desvio padrão foi calculado considerando o tempo de 500s a 1000s e o segundo de 1500s a 2000s.

Percebeu-se que o Circuito 2, 3 e 4 não tiveram resultados muito diferentes em relação ao controle do nível, o que pôde ser comprovado pelos valores próximos dos desvios padrões. Porém, uma situação que pode ocorrer é a taxa de material que entra no britador não ser o suficiente para mantê-lo cheio, mesmo com a velocidade do alimentador indo ao máximo, e com isso, o ideal seria diminuir a APF para manter o nível no valor do *setpoint*. Então, foi realizada uma simulação para confirmar que o controle da APF pode ser importante para a manutenção do nível no valor desejado.

4.3 Simulações para comprovar a importância de uma APF ajustável

No primeiro teste, a abertura da APF estava fixada em 38 mm. E, apesar da velocidade do alimentador (MV) ir ao máximo em $t = 100s$ (linha de tendência em vermelho), com o intuito de inserir mais material no silo, não foi possível manter o nível dele (linha de tendência em azul) no valor desejado, devido a abertura da posição fechada, APF, estar grande. Com isso, o nível sofreu um declínio até chegar em zero no tempo próximo de 1000s (Fig. 12).

No segundo teste, foi inserido um controlador PI para a APF, a qual pode variar em torno de 32 mm a 41 mm. A resposta do sistema com o controlador é a apresentada na Fig. 13. Constatou-se que o nível do britador atingiu e se manteve no valor desejado, devido à variação da APF (linha de tendência em laranja) e da velocidade do alimentador, mesmo com a taxa de alimentação baixa como no primeiro teste. A variação da APF ficou em torno do mínimo, que foi 32 mm de abertura. Apesar da velocidade ter saturado no primeiro e segundo teste, nesse último não foi motivo de problemas, devido ao controle ter a possibilidade de variar a APF.

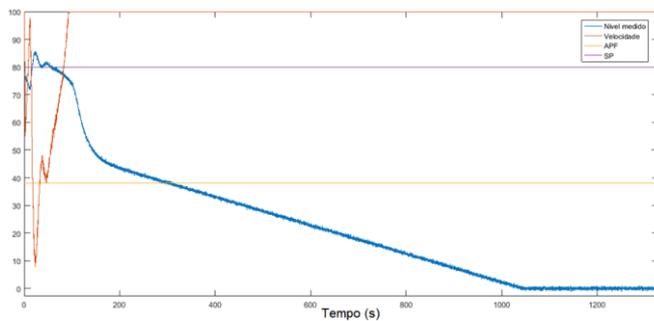


Fig. 12: Comportamento do nível, tendência em azul, no momento em que se tem pouca taxa na alimentação e a APF, tendência em laranja, é fixa. Velocidade do alimentador em vermelho (MV1) e *setpoint* em roxo.

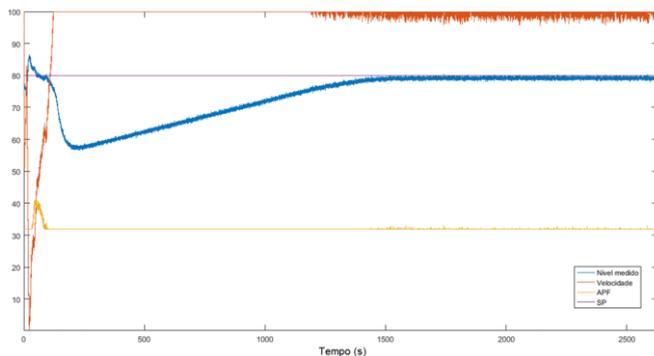


Fig. 13: Comportamento do nível, tendência em azul, no momento em que se tem pouca taxa na alimentação e a APF, tendência em laranja, é ajustável. Velocidade do alimentador em vermelho (MV1) e *setpoint* em roxo.

4.4 Comportamento do nível após mudanças na granulometria da alimentação do circuito

A última simulação realizada, com o intuito de representar de forma mais fidedigna a realidade de um circuito de britagem, implicou em variar a curva granulométrica do material britado, para verificar o desempenho do controlador. Inicialmente foi considerado um $d_{50} = 39,34$ mm, após quase 800s fez-se um novo ajuste para um $d_{50} = 18,48$ mm e após 1390s ajustou-se o d_{50} para 53,78 mm, sendo o d_{50} o tamanho da partícula correspondente quando a porcentagem acumulada chega a 50%. O primeiro d_{50} configurado foi o mesmo utilizado em todas as simulações das subseções anteriores. O segundo d_{50} teve o intuito de inserir mais quantidade de finos no circuito e o terceiro de inserir mais quantidade de partículas grossas.

Constatou-se que mesmo com a variação na granulometria, o nível do silo do britador se manteve no valor do *setpoint* de 80%, o que confirma que o controlador teve um bom desempenho. No momento em que a alimentação tinha muitas partículas finas, a velocidade do alimentador aumenta e a APF diminui levemente. A velocidade aumentou devido à facilidade de britar materiais finos. O oposto aconteceu no momento em que se adicionou partículas grossas, pois a velocidade do alimentador diminuiu, devido a esses materiais necessitarem de mais tempo para passar pela abertura do britador, Fig. 14. Ressalta-se também que a abertura foi aumentada pelo controlador a fim de manter o nível em 80%.

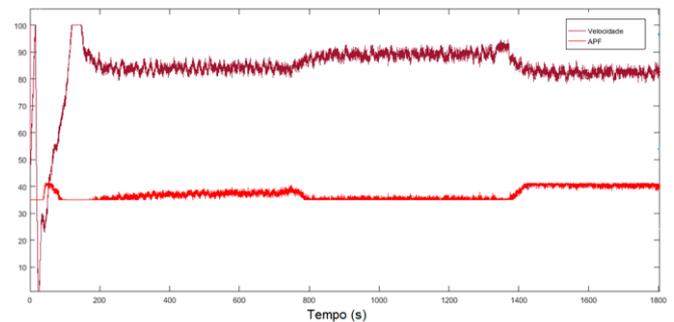


Fig. 14: Comportamento da velocidade do alimentador e da APF para os três d_{50} diferentes utilizados nessa simulação. Entrada $d_{50} = 39,34$ mm no instante entre $t = 0s$ e $t = 780s$, entrada $d_{50} = 18,48$ mm entre $t = 781s$ e $1390s$, e entrada $d_{50} = 53,78$ mm entre $t = 1391s$ e $1800s$.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que é possível reproduzir a dinâmica de um equipamento complexo como o britador de forma bastante satisfatória através de *software* de simulação. Devido às medições de nível de um britador apresentarem ruído, o que é normal para um instrumento, foi incluído um estimador de estado com o intuito de suavizar os valores medidos pelo sensor. Percebeu-se que ele conseguiu melhorar o controle, ou seja, o atuador necessitou de menores esforços, para estabilizar a variável de processo no valor da referência. Constatou-se também que o estimador pode ser utilizado numa falha dos medidores e que para o caso em estudo, conseguiu sustentar o nível por algumas horas, diferentemente dos resultados obtidos para a aplicação sem o emprego do estimador.

Comprovaram-se também os benefícios de um controle multivariável neste trabalho, no momento em que foi possível

realizar o controle do nível mesmo com uma taxa de alimentação baixa na entrada do britador, por meio do ajuste da velocidade do alimentador e da APF. Além disso, foi visto que é possível simular de forma mais fidedigna o processo real.

Por meio das várias estratégias e análises realizadas, foi possível identificar as variadas maneiras de se controlar o nível do britador. Cabendo ao projetista determinar qual estratégia se encaixa melhor para uma determinada situação. Quando o processo estiver estável, o melhor controle é o multivariável, utilizando o estimador de estado e as duas variáveis manipuladas. Porém no momento em que se perde a leitura do sensor, o melhor controle a ser chaveado é o SISO com o estimador, com isso, o processo contará com o benefício dos dois tipos de controle.

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); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

REFERÊNCIAS

- Atta, K. T; Johansson, A.; Gustafsson, T. (2013). Control oriented modeling of flow and size distribution in cone crusher. *Elsevier*. v. 56, pp. 81-90.
- Hulthén, E. *Real Time Optimization of Cone Crushers*. 2010. Tese de doutorado [Doctor of Philosophy in Product and Production Development] – Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Itävuo, P; Vilkkko, M; Jaatinen, A; Villo, K. (2013). Dynamic modeling and simulation of cone crushing circuits. *Elsevier*. v. 43-44, pp. 29-35.
- Itävuo, P., Hulthén, E. and Vilkkko, M. (2017). Feed-hopper level estimation and control in cone crushers, *Minerals Engineering*. Elsevier, v. 110, pp. 82–95.
- Jacobson, D; Janssen, P; Urbinatti, V. (2010). Cavity level's effect on cone crusher performance and production. In: *Procemin*, Chile (Santiago). pp. 15-21.
- King, R.P. 2012. *Modeling and Simulation of Mineral Processing System*. 2. ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood.
- Meireles, P.G.M.; Moreira, V.S.; Euzébio, T.A.M. (2018). Modelagem e simulação de britador cônico – estudo de caso em usina de Serra Leste. In: *19º Simpósio de Mineração*, São Paulo, pp. 345-355.
- Moreira, V. S; Euzébio, T.A.M. (2018). Modelagem e controle de abertura de câmara britadores cônicos. *Congresso Brasileiro de Automática*. v. 22; p. 1-8.
- Phillips, C. L.; Nagle, H. T. (1995). *Digital Control System Analysis and Design*. ed. 3. Prentice-Hall.
- Sachs, P. F. T. (2009). Cadeia de valor mineral e tecnologia da informação: alinhamento estratégico como gerador da eficácia em empresas de mineração. Tese – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*. v.13, pp. 291-309.
- Skogestad, S; Grimholt C. (2012). *PID Control in the Third Millennium*. Advances in Industrial Control. Springer Science & Business Media, London.