

MODELAGEM E CONTROLE DE ABERTURA DE CÂMARA BRITADORES CÔNICOS

VINICIUS DA S. MOREIRA¹, THIAGO A. M. EUZÉBIO²

¹Engenheiro de Minas, Vale S.A.

Estrada Raymundo Mascarenhas, S/N, Serra dos Carajás, Parauapebas-PA

²Instituto Tecnológico Vale - ITV

Avenida Juscelino Kubistchek, 31, Bauxita. Ouro Preto-MG

¹vinicius.silva.moreira@vale.com, ²thiago.euzebio@itv.org

Abstract— Given its importance in the process, this project aims to evaluate the use of a cone crusher simulator during the development of controllers for crushing plants. Firstly, the simulator's ability to reproduce the actual crushing conditions is evaluated, and then a Model Predictive Controller (MPC) is developed that will regulate the close side settling. A Proportional-Integral (PI) controller was also implemented for comparison. Disturbances were added to the process and the controllers' response was evaluated, both for of reaching the set point within performance parameters and in the control action itself, which must respect restrictions imposed by the actuator. The disturbance imposed to the process was changes in the operating point, changing the kind of material fed in the plant and coating wear. Thus, both controllers (MPC and PI) were able to correct the value of the output variable when the previously mentioned perturbations were added. Although the PI controller proves viable for the application presented in this study, it would not be applicable for the future application, which would be inserted in a multivariate scenario with restrictions. In contrast, the MPC controllers applies to both scenarios.

Keywords— Model Predictive Control, close side settling, cone crusher, modelling, nonlinear model.

Resumo— Dada a importância dos britadores cônicos no processo este trabalho visa avaliar a utilização de simulador de britador cônico durante desenvolvimento de controladores para plantas de britagem. Primeiramente se avalia a capacidade do simulador em reproduzir as condições reais de britadores e em seguida é desenvolvido um Controlador Preditivo por Modelo (MPC) que fará a regulação da abertura da câmara de britagem. Realizou-se ainda a implementação de um controle Proporcional-Integral (PI) para comparação. Perturbações foram adicionadas ao processo e avaliada a resposta dos controladores, tanto no que tange ao atingimento do *set point* dentro de parâmetros de performance quanto na própria ação de controle, a qual deve respeitar os limites do atuador. Tais perturbações representam mudanças no ponto de operação, início do processamento de minério mais grosso e resistente e desgaste do revestimento dos britadores. Sendo assim ambos os controladores (MPC e PI) foram capazes de corrigir o valor da variável de saída quando adicionadas as perturbações mencionadas anteriormente. Apesar do controlador PI se mostrar viável para aplicação apresentada neste estudo, não seria aplicável para a aplicação futura, a qual estaria inserido em um cenário multivariável com restrições. Em contrapartida, o controlador MPC é aplicável a ambos os cenários.

Palavras-chave— Controle Preditivo por Modelo, abertura na posição fechada, britador cônico, modelagem, modelo não linear.

1 Introdução

Britadores cônicos são amplamente usados em indústria de agregados e minerações. Estes equipamentos possuem alta confiabilidade mecânica e alta eficiência quando comparado a outros equipamentos que visam cominuir o material alimentado. Segundo Bernan *et al* (2011) a eficiência de quebra de britadores cônicos varia entre 60 e 80%, enquanto que moinhos do tipo autógenos e semi-autógenos variam entre 20 e 40%. Estes últimos são utilizados para fragmentações mais finas, onde os britadores cônicos possuem baixa eficiência.

Sendo assim, os britadores cônicos são utilizados para britagens secundárias, terciárias e quaternárias, visto a granulometria do material alimentado ser maior. Os circuitos secundários e terciários de britagem geralmente operam em circuito fechado com peneiramento, onde o material grosso, maior que a malha, é direcionado ao britador e o material britado retorna para a peneira, de forma a garantir que somente o minério menor que a malha seja direcionado para as operações unitárias subseqüentes.

A relação entre massa de minério que retorna ao britador e a alimentação nova da peneira é chamada de carga circulante. Quanto maior esta massa, menor a produtividade da usina, visto que a área de peneiramento é ocupada por material circulante, restringindo a entrada de nova alimentação vinda da mina. Sendo assim deve-se reduzir a carga circulante para que seja possível aumentar a produtividade da planta.

Desenvolver um controlador que permita a variação dinâmica da abertura na posição fechada (APF), dos britadores secundários permitiria reduzir a vazão mássica da carga circulante, dado o aumento da eficiência de britagem conciliada com a produtividade necessária. Sendo assim este projeto trata da avaliação da capacidade do modelo desenvolvido por Atta (2010) de simular plantas de britagem e de ser utilizado para desenvolvimento de controladores. Este simulador foi desenvolvido a partir da otimização do modelo de Whiten (1972) para britadores cônicos, acrescentando ao modelo o conceito de divisão do perfil vertical da câmara de britagem em zonas, sendo a alimentação da zona superior a própria alimentação do britador, a descarga de uma zona é a alimentação da zona ligeiramente inferior, até a última zona, a qual

sua descarga representa a descarga do britador. Permite ainda utilizar tipos de minério diferentes na alimentação do britador, o qual tratará de forma isolada os parâmetros relativos a resistência mecânica e volume ocupado por cada material na câmara de britagem.

Para avaliação do simulador foram construídos cenários de aplicações de perturbações na planta, como variação da abertura da câmara de britagem, mudança de tipo do minério alimentado, assim como de sua granulometria. A planta utilizada nesta avaliação se trata de um britador cônico que descarrega em uma peneira em circuito aberto, sendo o material retido (*oversize*) um produto mais grosso e o passante (*undersize*) um produto mais fino. Foram avaliados os impactos destas modificações nas variáveis granulometria do material britado e taxa de alimentação do britador, que para a planta utilizada se trata da produtividade de toda a planta.

Realizou-se ainda a comparação entre os resultados obtidos (granulometria de produtividade) utilizando um controlador preditivo por modelo (MPC) e um controlador Proporcional-Integral (PI). Em ambos os casos a variável controlada é a abertura do britador e variável manipulada é a razão entre o *oversize* e a alimentação da peneira. Para a planta em questão a razão é determinada conforme necessidade de aumento de produção do produto mais grosso ou mais fino, sendo consequência tanto do valor agregado de cada material quanto da demanda do mercado por cada um deles.

2 Motivação

Devido ao desgaste dos revestimentos dos britadores periodicamente é realizada a aferição. Este processo é realizado manualmente através do acionamento da botoeira do motor que regula a abertura câmara de britagem e checagem utilizando um gabarito introduzido na câmara do britador. Alterações na APF também são realizadas em momentos em que a granulometria da alimentação da britagem secundária está anormalmente grossa (quando há desgaste excessivo dos revestimentos do britador primário ou problemas com a malha da grelha vibratória), provocando aumento da corrente dos motores dos britadores secundários para além da corrente nominal, alarmando os sistemas de proteção. Neste caso aumenta-se a APF visando o alívio dos esforços realizado pelo britador, provocando redução da corrente. Porém esta ação causa redução da eficiência de britagem, consequentemente aumento da granulometria do material britado e carga circulante.

A APF é diretamente proporcional à eficiência de britagem. Quanto mais fechado está o britador mais as partículas são cominuídas, reduzindo o percentual de material que será retido nas peneiras subsequentes. Porém este parâmetro é inversamente proporcional à capacidade do britador, uma vez que reduz a abertura de passagem do material. De forma a verificar na prática se estas afirmações estão corretas, realizou-se

amostragem exploratória na planta de Serra Leste, onde realizou-se aferição do britador em três aberturas distintas (35mm, 38mm e 41mm), amostrando o material britado em seguida. A alimentação do britador também foi amostrada. A Figura 1 mostra os fluxos amostrados.

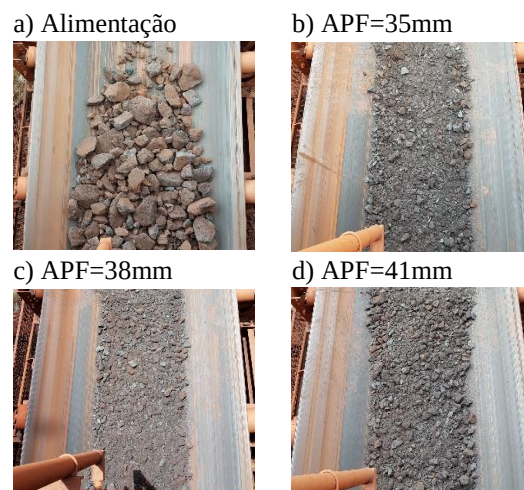


Figura 1. Minério amostrado.

As amostras foram encaminhadas ao laboratório para realização de análise química e granulométrica. O resultado da granulometria é apresentado na Figura 2, onde mostra que quanto menor a APF mais fino será o material da descarga do britador.

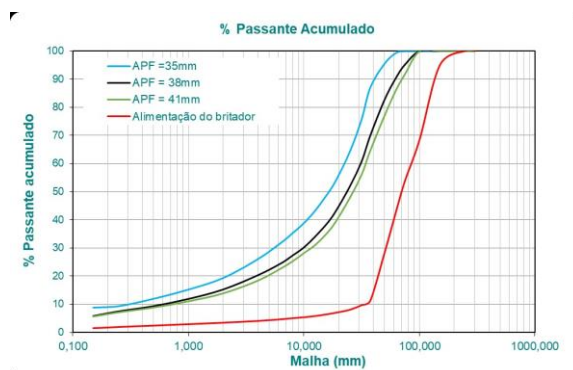


Figura 2. Curvas granulométricas do minério amostrado.

A Figura 3 mostra que quanto menor a APF menor será a capacidade de processamento do britador. Porém a curva não se mostra linear, sendo a capacidade para abertura em 38mm muito próxima à capacidade para abertura em 41mm.

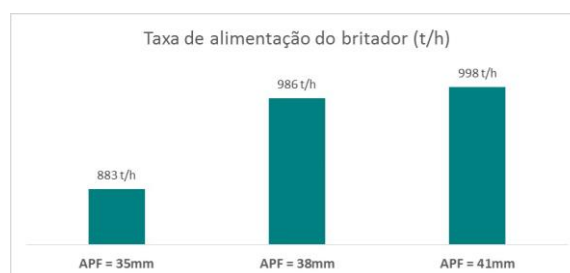


Figura 3. Taxa de alimentação para diferentes aberturas.

Dessa forma, como os resultados em campo corroboraram com a expectativa, o que mostra que é possível desenvolver controladores para a granulometria de produtividade tendo a APF como variável manipulada.

A automatização da aferição do britador é necessária tanto para correção do desgaste dos revestimentos quanto para adequação à necessidade da planta, como priorização da produtividade em detrimento da granulometria e vice e versa. Assim a planta estaria constantemente trabalhando dentro dos parâmetros pré-determinados.

3 Modelo de britador cônico desenvolvido por Atta (2010)

Esta Seção é dedicada à apresentação do modelo de britagem desenvolvido por Atta (2010) em sua tese de doutorado. O objetivo do modelo é prever a vazão mássica de minério e a distribuição granulométrica do material britado a partir da variação da abertura na posição fechada e da velocidade do excêntrico. Dada à impossibilidade de variação da velocidade do excêntrico para o modelo de britador instalado em Serra Leste, este trabalho adotou como variável manipulada somente a APF, mantendo a velocidade constante.

O autor Atta (2010) se baseou no modelo desenvolvido por Whiten (1972) que assume que as partículas podem ser quebradas ou passarem sem serem cominuídas, e aquelas que foram quebradas a chance de serem quebradas novamente ou caírem sem sofrer nova quebra. A estes mecanismos se dá o nome de função classificação e função quebra, sendo a primeira a proporção de partículas que serão aprisionadas pelo movimento rotativo do manto do britador e a função quebra a proporção daquelas classificadas que serão efetivamente cominuídas. A taxa de quebra das partículas, chamada de função seleção, é a frequência dos eventos de quebra, representando a velocidade com que as frações granulométricas desaparecem (Gomes, 2014). Esta última está intimamente relacionada às variáveis geométricas da câmara de britagem.

Neste modelo é introduzido o conceito de divisão da câmara de britagem em zonas horizontais (Figura 4). A distribuição granulométrica do material alimentado na primeira zona é dado de entrada do modelo, sendo a granulometria de saída desta zona a alimentação da zona seguinte, e assim por diante.

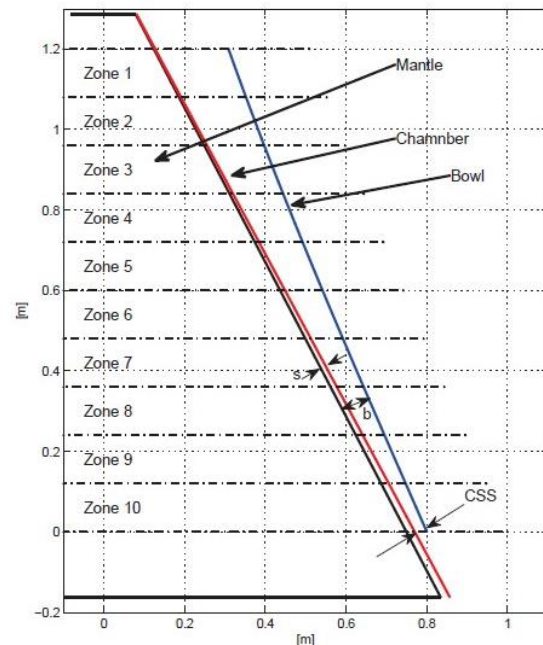


Figura 4. Variáveis geométricas do britador (Atta, 2010).

A Figura 5 mostra um diagrama indicando todas as ações, classificação (C_i), seleção (S_i) e quebra (B_i) sofrida por cada fração de material em cada zona do britador:

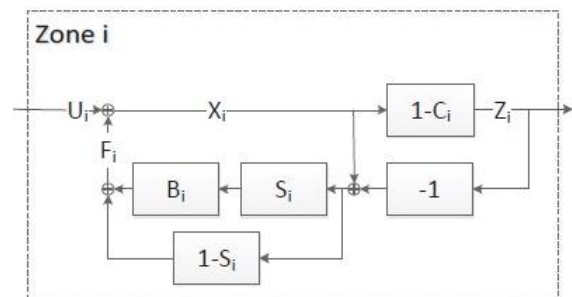


Figura 5. Modelo dinâmico da zona i simplificado (Atta, 2010).

Os vetores U_i , Z_i , X_i e F_i , respectivamente se tratam da distribuição granulométrica da alimentação, descarga, material dentro e material retido na Zona i . Dessa forma a alimentação da zona seguinte será a descarga da zona anterior. As ações descritas acima ocorrem a cada ciclo do manto, ou seja, a taxa de repetição destas ações é determinada pela velocidade de rotação do excêntrico. Como esta velocidade geralmente é muito alta, o tempo de rotação não é grande o suficiente para dar tempo do material classificado passar e ser deslocado para a zona inferior, podendo sofrer novas ações de quebra e seleção.

A partícula selecionada é aprisionada entre o manto e o bojo, a duração desse aprisionamento é uma fração muito pequena do tempo de ciclo. O tempo restante (ηT) a partícula poderá descer para a zona inferior, sendo o fator η a fração do tempo de ciclo. Muitas vezes a velocidade de rotação do manto é alta de tal forma que a distância percorrida pela partícula durante o tempo ηT é menor que a largura da zona. Sendo as-

sim parte do material é aprisionado novamente no próximo ciclo, sofrendo as ações de quebra e seleção. Dessa forma o autor acrescentou o fator β_i , o qual é uma relação entre a massa de material que passaram para a zona inferior e a massa de material classificado para passar. Outro fator adicionado pelo autor é o α_i , o qual pode estar entre 0 e 1 e é tratado como fator de capacidade da zona, sendo o percentual do produto de uma zona que segue para a zona seguinte após a ação de classificação. Dessa forma parte do material pode se manter na mesma zona devido a zona seguinte já estar em sua capacidade máxima, ou seja, cheia de partículas, não havendo espaço para a entrada de mais material até que parte desta massa se desloque para a zona inferior (Figura 6).

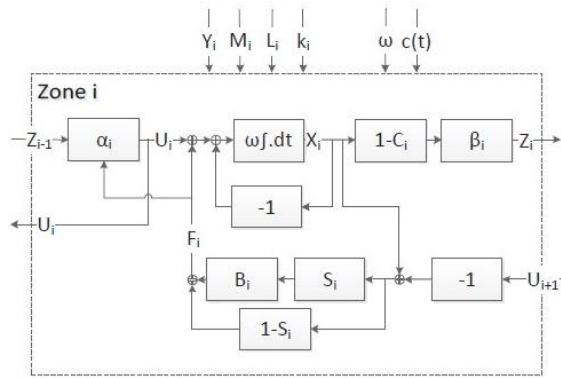


Figura 6. Modelo dinâmico da zona i detalhado (Atta, 2010).

Para construção do modelo é necessário o conhecimento das variáveis geométricas do britador, visto que influencia na eficiência e capacidade do equipamento. Os ângulos formados entre o bojo e o manto determinam a força aplicada ao material, fragmentando-os se for maior que a resistência das partículas, assim como o volume de minério a ser britado, o que influencia em sua capacidade. O minério passa entre estes revestimentos até a parte inferior, onde é descarregado. O movimento excêntrico do eixo provoca o ciclo de aproximação e distanciamento entre revestimentos.

Outro parâmetro pertinente ao britador é a função classificação, descrita abaixo (Atta, 2010) *apud* (Hulthen & Evertsson, 2008):

$$C(t, y, D_j) = \begin{cases} c_0(t, y, D_j), \\ 0, \\ 1, \end{cases} \quad (1)$$

$$C_0(t, y, D_j) = 1 - \left(\frac{D_j - d_2(t, y)}{d_1(t, y) - d_2(t, y)} \right)^n \quad (2)$$

$$d_1(t, y) = CSS_i(y, CSS) \quad (3)$$

$$d_2(t, y) = OSS_i(y, CSS) \quad (4)$$

Os valores de CSS_i e OSS_i representam a abertura na posição fechada e aberta, respectivamente, para cada zona. D_j é o diâmetro das partículas. Dessa forma a função classificação é determinada pela abertura do

britador, e representa a probabilidade de a partícula ser aprisionada pelo manto em seu movimento rotacional. De posse das regressões realizadas para o bojo e manto, onde uma função representará a geometria destas superfícies, e da APF do britador é possível calcular a função classificação.

A função seleção adotada por Atta (2010) é baseada em Evertsson (1998) o qual introduziu a razão “s/b” na equação desenvolvida por Gauldie (1953), sendo “b” a distância entre bojo e o manto (altura da camada) quando este está na posição aberta. O parâmetro “s” (*stroke*) se trata da distância entre o manto na posição aberta e o próprio manto na posição fechada. A razão entre estas variáveis determina como a partícula será quebrada, visto que se uma partícula for maior que a dimensão “b”, obrigatoriamente será quebrada, ou seja, a função seleção será 1 e mecanismo de quebra será partícula-revestimento. Para partículas menores que “b” o mecanismo de quebra será partícula-partícula (Evertsson, 1998).

$$s(D_j, t, y) = s_0(\sigma(t, y)) D_j^a \quad (5)$$

Sendo $\sigma(t, y)$ a relação de compressão (s/b), a qual é função da abertura do britador e da altura.

Além das variáveis relativas ao equipamento é necessário levantamento das variáveis pertinentes ao minério. Sendo os parâmetros n_1 , n_2 e K da equação 6 característicos de cada material.

$$B(D_1, D_2) = K \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{n_2} \quad (6)$$

Onde B(D₁, D₂) é o percentual de partículas menores que D₁, que foram geradas a partir da quebra de uma partícula de tamanho D₂. A primeira parte da equação descreve a distribuição granulométrica das frações finas na população de partículas provenientes do evento de quebra, sendo K a fração destas partículas.

Como o modelo de Atta (2010) utiliza a velocidade do excêntrico como variável controlada, o fator η da equação 6 também é variável. Como neste trabalho a variável manipulada é a APF, fixou-se a velocidade para um valor constante e, consequentemente, η também constante.

Utilizando as equações da função quebra, seleção, classificação, restrição de capacidade, restrição de largura das zonas, Atta (2010) construiu uma rotina em Matlab, e a partir do diagrama mostrado na Figura 6. Dessa forma a resposta do modelo para dado minério alimentado é a granulometria da saída do britador, assim como a vazão de minério.

4 Desenvolvimento dos Controladores

Utilizando o programa Simulink construiu-se o controlador para o simulador que utiliza o modelo de Atta (2010), conforme Figura 7.

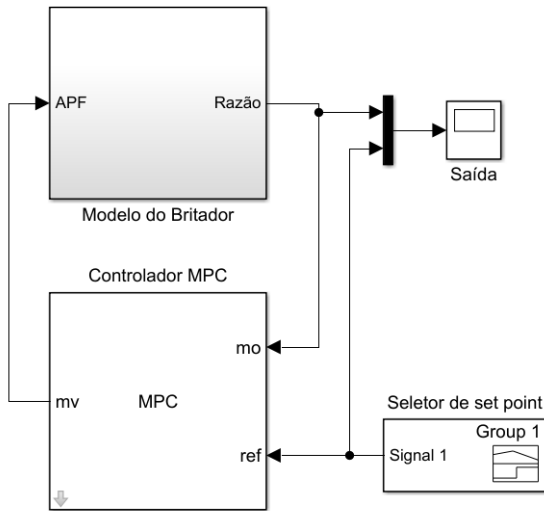


Figura 7. Modelo de blocos em Simulink.

Para desenvolvimento de ambos os controladores foi necessária a identificação da função de transferência do sistema. Para isto foi aplicado um sinal degrau da entrada e amostrado o sinal de saída até a estabilização da resposta. O ponto de operação, ou seja, o valor inicial da APF, foi de 40mm. O resultado é exibido na Figura 8, onde o ganho representa a razão.

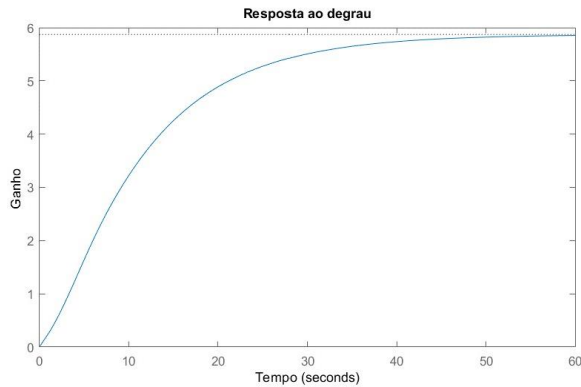


Figura 8. Resposta ao degrau.

Para o caso estudado restringiu-se a ação de controle para valores entre 25mm e 55mm para a APF. O horizonte de controle e predição e o coeficiente de supressão do movimento foram determinados de forma a aumentar a obter desempenho e robustez adequados ao processo. Buscou-se uma sintonia tal que a resposta atinja o set point de forma rápida, porém respeitando a dinâmica do atuador que fará a regulagem da APF. Os parâmetros adotados foram: $H_p = 15$, $H_u = 7$, $\lambda = 10$.

Para sintonia do controlador PI, utilizou-se o Método a curva de reação para se chegar a uma função de transferência de primeira ordem. A Figura 8 foi utilizada para determinar os parâmetros K , τ e θ , que são o ganho, a constante de tempo e o atraso, respectivamente. O controlador MPC se utilizou da resposta ao degrau mostrada na Figura 8, sem necessidade de simplificação para função de primeira ordem.

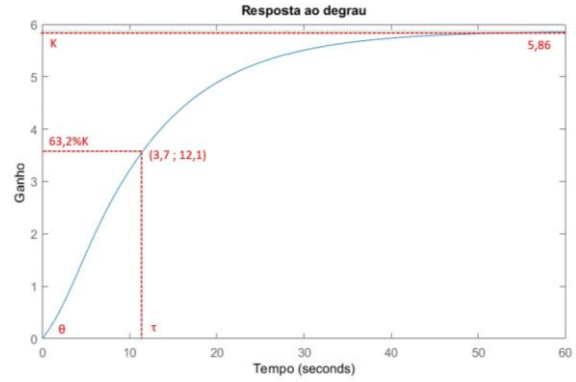


Figura 9. Determinação dos parâmetros de forma gráfica.

A Figura 9 mostra que não há atraso e a função de transferência de primeira ordem é descrita na equação 7:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{5,86}{12,1s + 1} \quad (7)$$

A função de transferência de primeira ordem obtida acompanha a função de transferência da planta com pequenas variações conforme Figura 10.

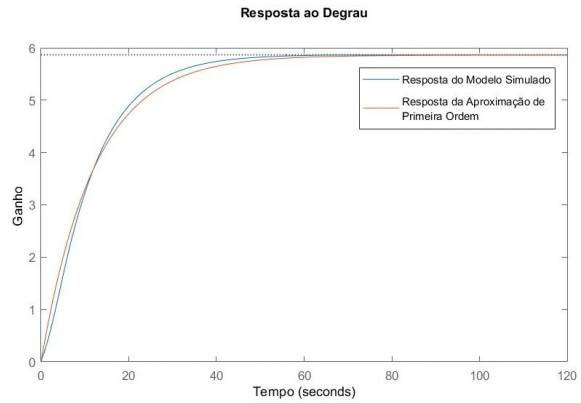


Figura 10. Resposta ao degrau para sistema de alta ordem e primeira ordem.

Neste trabalho a formulação adotada para o controlador PI é apresentada na equação 8.

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (8)$$

Para determinação dos parâmetros do PI foi utilizado o Método do Modelo Interno (IMC) o qual utiliza o modelo do processo e a especificação de desempenho para calcular os parâmetros K_p (Proporcional) e T_i (Integral) de controladores PI.

Tabela 1: Método IMC para determinação dos parâmetros PID.

Controlador	K_p	T_i
PI	$\frac{2\tau + \theta}{2K\lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$

O parâmetro λ define o tempo para a saída do processo atingir o set point. Dessa forma, tem-se: $K_p = 0,343$, $T_i = 12,1$, $\lambda = 0,5$ τ . Como $K_i = K_p/T_i$, então $K_i = 0,028$.

5 Resultados Simulados

4.1. Avaliação do Modelo de Simulador de Britador Cônico de (Atta, 2010)

Para avaliar o modelo foi utilizado o caso mais simples de planta de britagem, onde o material britado é peneirado, gerando dois fluxos de produto, conforme Figura 11, visto que o objetivo é avaliar somente o comportamento da granulometria do material britado e taxa de alimentação do britador para cenários de variações de APF e características do minério (granulometria e resistência mecânica). Portanto foge do escopo da avaliação a utilização de modelos de peneiramento, o qual calcularia de forma mais assertiva a divisão do material britado entre *oversize* e *undersize*. Para tanto realizou-se a tal divisão conforme malha do peneiramento, com eficiência de 100% para todas as malhas, ou seja, todo o material maior que a malha segue para o *oversize* e menor que a malha segue para o *undersize*.

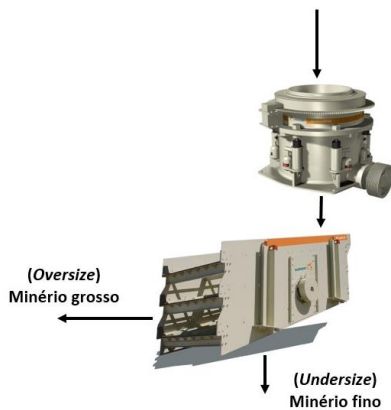


Figura 11. Planta de britagem adotada para a avaliação do modelo.

Inicialmente foi alimentado no simulador um ROM composto por duas litologias, chamadas aqui por material A e B, sendo a primeira composta por material mais resistente e grosso nas frações maiores que a malha da peneira (16mm), conforme Figura 12, e o segundo se trata de minério mais fino e friável. A avaliação se deu a partir da variação da APF do britador e análise das seguintes variáveis: (i) eficiência de britagem na malha do peneiramento, (ii) razão (proporção de produto granuloso em relação à alimentação da planta) de ambos materiais, (iii) produtividade de cada material, (iv) granulometria do minério britado para cada material, (v) construção de gráfico com razão x APF x tipo do material, (vi) construção de gráfico com taxa de alimentação do britador x APF x tipo

do material. O simulador deve gerar as respostas à variação da APF de forma coerente com a granulometria e resistência mecânica do britador e ainda, tais respostas devem surgir de forma transiente entre as mudanças do ponto de operação, fato que em plantas reais acontece.

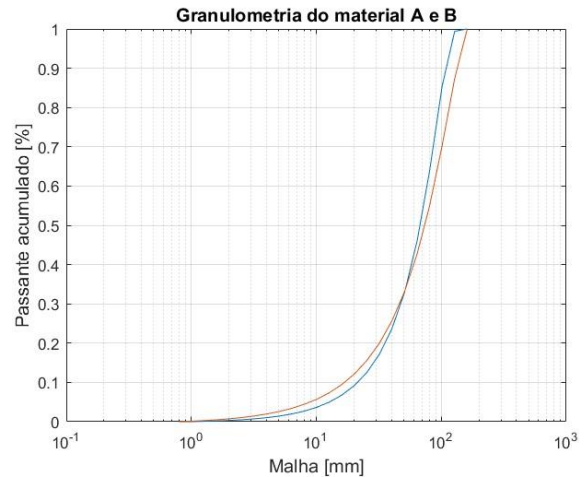


Figura 12. Granulometria da alimentação do britador, material A e B.

Como mostrado na Figura 13, a eficiência de britagem reduz quando se aumenta a APF. É possível calcular a eficiência de britagem em cada malha utilizada para análise granulométrica, sendo as mais relevantes a eficiência na malha igual a abertura da tela da peneira que é alimentada pelo britador. Como o material A é mais resistente, é natural que sua eficiência de britagem seja menor que a do material B. Dessa forma o resultado do simulador se apresenta coerente com a prática.

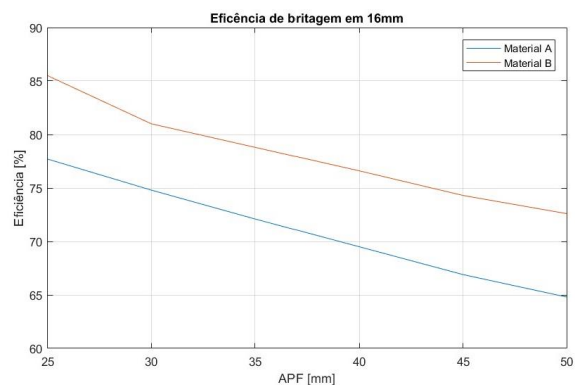


Figura 13. Eficiência de britagem.

A Figura 14 mostra que quanto maior a abertura do britador maior será razão, visto que a eficiência de britagem será menor, o que gera um material mais grosso na saída do britador. Conforme o esperado, a curva para o material A está acima do material, indicando que a produção de material granuloso será maior para o material que apresenta maior percentual de partículas grossas.

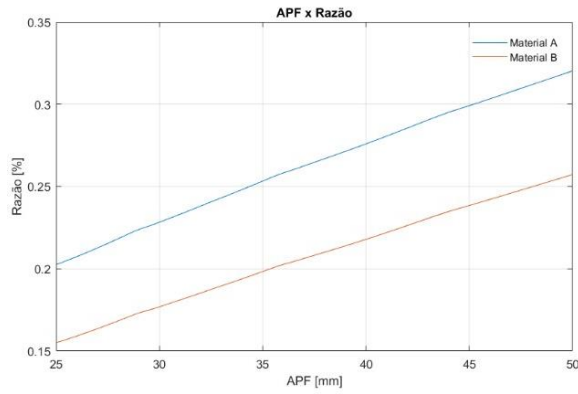


Figura 14. APF x Razão.

4.2. Desenvolvimento dos controladores

A Figura 15 mostra a resposta ao degrau ascendente e descendente para a razão. Verifica-se que a performance do controlador MPC é mais rápida. No que tange à ação de controle, verifica-se que quando a set point da razão reduziu, foi necessário o fechamento do britador e o inverso ocorreu quando a set point da razão aumentou. Verifica-se ainda a queda da produção de granulado quando os controladores realizaram o fechamento do britador.

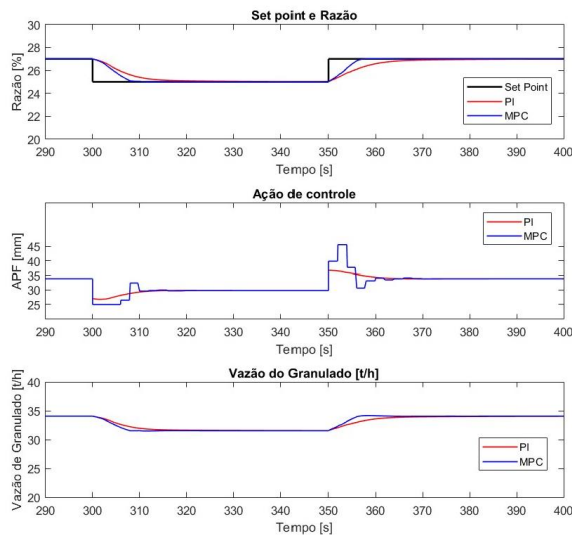


Figura 15. Resposta ao degrau para a razão utilizando controlador MPC e PI.

As Figuras 16 e 17 mostram a resposta dos controladores à presença de distúrbios. No caso da Figura 16 houve mudança do tipo de minério alimentado na planta, passando de 100% de material A para 100% de material B. Nos instantes seguintes percebe-se uma redução da razão, visto que o material B apresenta minério de granulometria mais fina que o material A, assim como menor resistência mecânica. Os controlares realizam a abertura do britador de forma a atingir o set point de razão. Novamente o controlador MPC se mostra mais rápido.

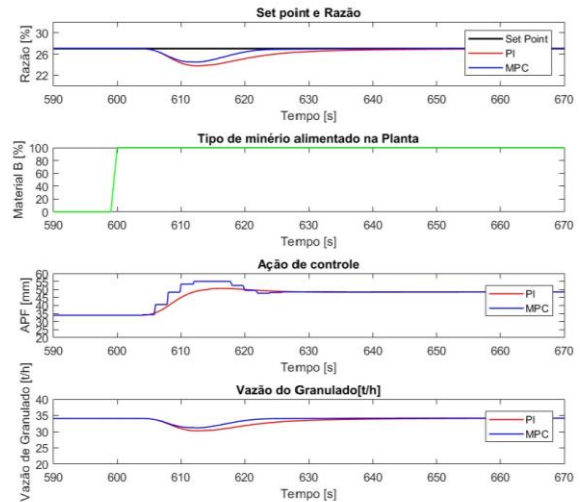


Figura 16. Resposta à alteração da granulometria da alimentação do britador.

Outra perturbação inserida foi o desgaste do revestimento, de forma a verificar se os controladores são capazes de corrigir a APF e manter a razão segundo o set point. Conforme a Figura 17, percebe-se que os controladores atuam constantemente na abertura do britador, realizando o fechamento do britador na mesma proporção que o desgaste aumentaria esta abertura.

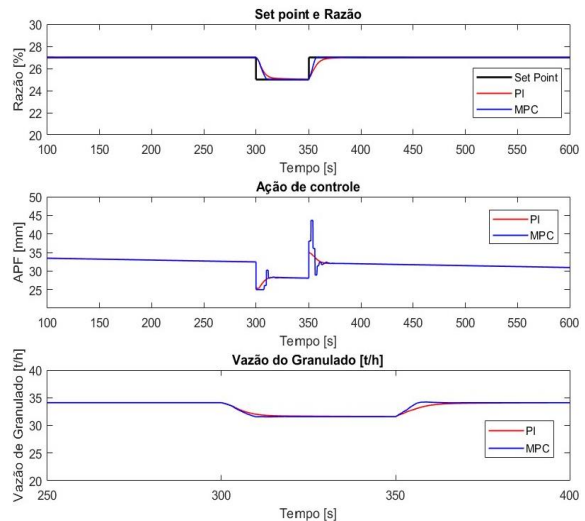


Figura 17: Resposta ao desgaste dos revestimentos do britador.

A Tabela 2 apresenta a integral do erro absoluto ao realizar alteração do *set point* para a razão (Figura 17) e para a mudança do material alimentado na planta, passando de material B para material A (Figura 16). Em ambos os casos o erro do controlador MPC é inferior ao do PI.

Tabela 2: Integral do erro absoluto.

	MPC	PI
Degrau	0,0797	0,1529
Distúrbio	0,2747	0,5191

6 Conclusão

A indústria da mineração, principalmente as de produção a seco de minério de ferro, pouco se utiliza de processos automatizados para regulação das variáveis desejadas. Uma aplicação em planta de britagem foi abordada no trabalho e mostrou que há ganhos em utilizar controladores no processo, compensando inclusive desgaste de revestimento de britador. Outro pilar do projeto trata da validação de simulador de britador, assim como sua aplicabilidade para desenvolvimento de controladores.

O simulador utilizado neste trabalho reproduz variações na granulometria e na capacidade do britador em conformidade com dados obtidos em análise exploratória em Serra Leste. Como o simulador utilizado se trata de um britador genérico as curvas granulométricas do material britado não são compatíveis com a do teste exploratório, porém o que se está avaliando neste trabalho é somente o comportamento geral, onde constatou-se que quanto menor a APF mais fino será o material britado. Para representação de uma planta real específica o simulador deve sofrer um processo de calibração com dados geométricos do britador e amostragens do minério em campo. De forma análoga, o modelo simulado reproduziu redução de capacidade quando se reduziu a abertura da câmara de britagem.

O controlador MPC desenvolvido foi capaz de variar a produção de minério grosso conforme valores pré-determinados como sendo o set point do sistema, atendendo aos requisitos de performance, assim como o controlador PI.

Um problema constante de plantas de britagem é falta de regulação da APF dos britadores para corrigir o desgaste dos revestimentos. Tal regulação necessita de parada do britador e segue um procedimento de segurança que demanda cerca de 30 a 40 minutos. A utilização de controlador resolveria esta falha no processo produtivo. Como visto no Capítulo anterior, o controlador foi capaz de compensar o desgaste.

Como se trata de um processo SISO era esperado que o controlador PI também respondesse de forma adequada tanto às variações de set point quanto às demais perturbações. Neste caso o controlador MPC gera um menor tempo de acomodação, assim como atinge o set point pela primeira vez de forma mais rápida. Porém, em processos MIMO a utilização de controlador MPC se mostra adequada, sendo capaz de lidar com um cenário com restrições.

O modelo é viável para desenvolvimento de sistemas de controle, dada sua capacidade de simular uma planta de britagem de forma dinâmica, onde os parâmetros podem ser alterados por um sistema de

controle e a resposta pode ser retornada ao controlador, o qual calculará o erro e ajustará a variável manipulada em caso de necessidade.

Referências Bibliográficas

- Atta, K. (2010). *Modelling and On-Line Optimization of Cone Crushers*. Lulea, Sweden: Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering.
- Berman, R., Munro, S., & Evertsson, C. (8-9 de August de 2011). Chusher - An Essential Part of Energy Efficient Comminution Circuits. *Metallurgical Plant Design and Operating Strategies*, (pp. 67-68). Perth, Australia.
- Evertsson, C. (1998). Output prediction of cone crushers. *Minerals Engineering*.
- Gauldie, K. (1953). Performance of Jaw Crushers. *Engineering*.
- Gomes, W. (2014). Integração de modelos energéticos e de balanço populacional para simulação de moagem em moinhos de bolas. *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*.
- Hulthen, E., & Evertsson, C. M. (2008). On-line optimization of crushing stage using speed regulation. *Proc. of XXIV International Mineral Processing Congress*,. Beijing, China.
- Whiten, W. (1972). The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. (pp. 257-264). *Journal of the African Institute of Mining and Metallurgical*.