

APLICAÇÃO DE CONTROLADOR PREDITIVO POR MODELO EM UM SIMULADOR DE CIRCUITO DE MOAGEM*

Lucas Andery Reis¹

Thiago Antonio Melo Euzébio²

Resumo

No processo de beneficiamento mineral, a moagem é o último estágio da etapa de cominuição de minérios responsável pela redução das partículas à liberação do mineral a ser concentrado nos processos subsequentes. Um problema presente nesse processo é a moagem em excesso do material, que aumenta a potência consumida na moagem, dificulta a recuperação das partículas muito pequenas nas etapas de concentração e prejudica a operação de filtragem do processo de pelletização por entupimentos ocasionados pelo material mais fino do que o especificado. Para melhorar o desempenho da moagem e reduzir seu custo operacional, se faz necessário estudar estratégias de controle adequadas que controlem melhor as diversas variáveis existentes nesse processo. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi utilizar um simulador de circuito de moagem com o intuito de comparar o desempenho da planta sendo controlada por controle clássico (PID), que é amplamente utilizado em circuitos de moagem, e por controle preditivo por modelo (MPC), que é aplicado em uma camada acima dos PIDs. Foi possível concluir que o circuito de moagem sendo controlado por MPC obtém melhor desempenho do que o PID, possibilitando trabalhar com as variáveis mais próximas de seus limites ótimos de operação.

Palavras-chave: Controle avançado; Controle preditivo por modelo; MPC; Circuito de moagem.

APPLICATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROLLER ON A GRINDING CIRCUIT SIMULATOR

Abstract

In mineral processing, grinding circuit is the last stage of the ore comminution step responsible for particle reduction to the release of the mineral to be concentrated in the subsequent processes. A problem present in this process is the excessive milling of the material, which increases the power consumed in the milling, hinders the recovery of the very small particles in the concentration steps and impairs the filtration operation of the pelletizing process by clogging caused by the thinner material of the than specified. To improve grinding circuit performance and reduce its operational cost, it is necessary to study adequate control strategies to improve control the various variables existing in this process. In this sense, the objective of this work was to use a grinding circuit simulator to compare the performance of the plant being controlled by classical control (PID), which is widely used in grinding circuits, and by model predictive control (MPC), which is applied in a layer above the PIDs. It was possible to conclude that the grinding circuit being controlled by MPC obtains better performance than the PID, allowing to work with the variables closer to their optimal limits of operation.

Keywords: Advanced control; Model predictive control; MPC; Grinding circuit.

¹ Engenheiro de Controle e Automação, Mestrando em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração na Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais.

² Engenheiro Eletricista, Doutor em Engenharia Elétrica, Pesquisador do Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais.

1 INTRODUÇÃO

No processo de beneficiamento mineral, a moagem é o último estágio da etapa de cominuição de minérios sendo responsável pela redução das partículas por meio da combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado à liberação do mineral a ser concentrado nos processos subsequentes. Para isso, a moagem requer um consumo energético elevado e por isso é o processo com o maior custo operacional numa planta de beneficiamento mineral, como exemplifica Chaves e Clark em [1], onde coloca esta operação unitária como responsável por 40% dos custos totais no processamento de minérios de cobre.

A granulometria do produto dessa etapa é a principal variável em um circuito de moagem. O minério tem que ser triturado até um tamanho ótimo de liberação em que as partículas minerais estejam expostas para o processo de concentração. Um problema recorrente é a moagem em excesso do material, que além de aumentar a potência consumida na moagem, dificulta a recuperação das partículas muito pequenas nas etapas de concentração e prejudica a operação de filtragem do processo de pelotização por entupimentos, ocasionados pelo material mais fino do que o especificado.

Os circuitos de moagem possuem como característica a presença de um número grande de variáveis e, por isso, é classificado como um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO). Nesse tipo de circuito, ao manipular alguma dessas variáveis, outras podem ser influenciadas de forma indesejada. Além disso, é comum nesse tipo de sistema haver um grande tempo de atraso, parâmetros variáveis no tempo e não-linearidade que podem provocar comportamentos indesejados no processo [2]. Por estas razões, o controle de circuitos com moinhos torna-se complexo e requer atenção no desenvolvimento das estratégias de controle.

A maioria desses processos é controlado por múltiplos controladores proporcionais-integrais-derivativos (PID), conhecidos como controle clássico, que tem seu desempenho limitado pelas propriedades da estrutura fixa e são desacoplados para evitar interações indesejáveis quando as variáveis manipuladas não são corretamente selecionadas. No entanto, existem estudos recentes que tem por objetivo aplicar estratégias de controle avançado em circuitos de moagem como a aplicação de controle adaptativo, *fuzzy* e controle preditivo por modelo (MPC) tratados nas publicações [2], [3], [4] e [5].

O controle preditivo por modelo (*model predictive control* - MPC) surgiu no final dos anos setenta e tem evoluído consideravelmente desde então. O termo controle preditivo designa uma gama muito ampla de métodos de controle que fazem o uso de um modelo do processo para prever sua saída em instantes de tempo futuros e obter o sinal de controle para minimizar uma função objetivo [6]. Além disso, o MPC demonstra características notáveis quando aplicado a um grande número de variáveis e em processos difíceis, tais como processos com grandes atrasos de tempo, características variáveis no tempo e não-linearidade [2].

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi comparar o desempenho de uma planta de moagem sendo controlada por controle clássico (PID) e por controle preditivo por modelo, sendo que o MPC é aplicado em uma camada acima dos PIDs. Para isso, utilizou-se um simulador dinâmico de moagem com moinho de bola, detalhado por Sbarbaro, D. e Del Villar, R. em [7], para a aplicação das estratégias de controle. O intuito é avaliar as características e benefícios da aplicação do controlador MPC em

um circuito de moagem simulado para, posteriormente, aplicar a estratégia de controle ideal em um circuito de moagem real.

O artigo apresenta o circuito de moagem em estudo na seção 2, bem como o simulador e os controladores PID e MPC na seção 3. Na seção 4 é apresentado o procedimento realizado na identificação e modelagem do processo. Os resultados alcançados são apresentados na seção 5. Por fim, a conclusão é apresentada na seção 6.

2 O CIRCUITO DE MOAGEM SIMULADO

O circuito de moagem utilizado para o desenvolvimento e aplicação do controle preditivo é um processo via úmida, denominado moagem secundária, responsável pela adequação da granulometria para a etapa de flotação em colunas e para o transporte via mineroduto, que leva o minério para o processo de pelotização. Está localizado entre as etapas de flotação convencional e flotação em colunas, e é composto por duas linhas idênticas constituídas por um moinho de bolas cada, que opera em circuito fechado com dupla classificação por conjuntos de hidrociclones, além de bombas que tem a função de transportar a polpa de minério para os hidrociclones da alimentação e da descarga do moinho.

Sua alimentação é proveniente do produto final da etapa de flotação convencional que passa por um tanque intermediário entre as etapas. Assim, a polpa é bombeada para o primeiro conjunto de classificação por hidrociclones. O produto dessa classificação é separado em dois fluxos: *overflow* (fluxo superior) contém as partículas mais finas que alimentam a caixa de descarga do moinho e *underflow* (fluxo inferior) contém as partículas maiores que alimentam o moinho de bolas, sendo que a ação das bolas reduz a granulometria do material. Esse material da descarga do moinho somado ao material do *overflow* do primeiro estágio de classificação alimentam o segundo conjunto de hidrociclones, onde seu *overflow* é o produto final e seu *underflow* retorna ao moinho.

Esse processo, bem como a maioria dos processos de moagem, é considerado multivariável e é controlado por múltiplos controladores proporcionais-integrais-derivativos (PID). Abaixo é ilustrado um esquema básico do circuito de moagem (Figura 1).

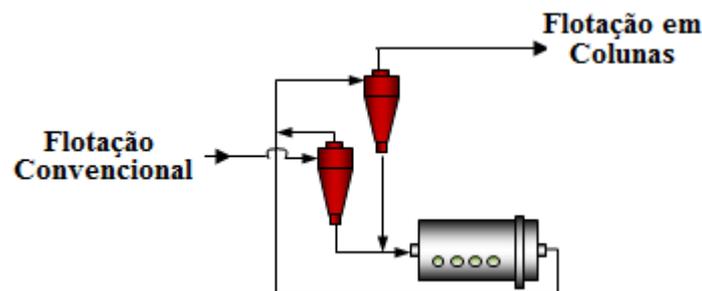


Figura 1. Esquema básico do circuito de moagem.

Devido ao problema de moagem em excesso do material, descrito anteriormente, se faz necessário estudar uma estratégia de controle capaz de melhorar o desempenho da planta e reduzir a moagem em excesso do material e conseqüentemente melhorar o processo de concentração e reduzir o consumo de energia elétrica pelo moinho. Para isso, foi utilizado um simulador de circuito de moagem com o intuito de

modelar os equipamentos que compõem o circuito a fim de obter um processo próximo ao real para ser utilizado no desenvolvimento dos controladores PID e MPC. O simulador utilizado neste trabalho corresponde a um conjunto de modelos descritos por Sbárbaro no livro "Controle Avançado e Supervisão de Plantas de Processamento Mineral" em [7]. Trata-se de um simulador dinâmico, em que se pode investigar diversas situações na moagem a partir de alterações de parâmetros existentes na planta. Este simulador foi desenvolvido na ferramenta Matlab/Simulink.

3 AS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE APLICADAS

Nesta seção é descrito o controle PID e o controle preditivo por modelo (MPC) aplicados ao circuito de moagem simulado.

3.1 Controle PID

Controladores PID possuem larga aplicação em processos industriais. Isto se deve, em grande parte, ao seu bom desempenho observado quando aplicado em malha fechada e em processos com dinâmica conhecida. Sua facilidade de implantação e manutenção favorece a sua implementação em malhas de controle com uma única variável a ser controlada.

A lógica de controle baseia-se no cálculo do erro $e(t)$ entre o valor desejado $r(t)$ e o retorno da planta $y(t)$, isto é, $e(t) = r(t) - y(t)$. Desse modo, a lei de controle do controlador (Figura 2), em tempo contínuo, é descrita pela equação (Equação 2):

$$C = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

onde, K_p , K_i , K_d são os ganhos proporcional, integral e derivativo do PID. A seleção ótima dos ganhos é realizada utilizando métodos de sintonia existentes na literatura, como Método de Ziegler e Nichols, Método de Cohen Coon, Método do Modelo Interno (IMC), etc. Uma compilação de métodos de sintonia PID pode ser visto em [8].

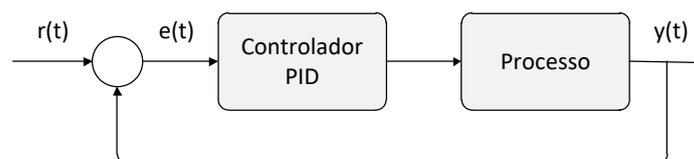


Figura 2. Aplicação do controle PID em malha fechada.

3.2 Controle Preditivo por modelo

O controle preditivo por modelo surgiu no final dos anos setenta e tem evoluído consideravelmente desde então. O termo controle preditivo designa uma gama ampla de métodos de controle que fazem o uso de um modelo do processo para prever sua saída em instantes de tempo futuros e obter o sinal de controle para minimizar uma função objetivo [6]. Tem como vantagem a capacidade de controlar uma grande variedade de processos como sistemas com tempo morto significativo ou com não-linearidades, além de não apresentar dificuldades adicionais no desenvolvimento para sistemas multivariáveis.

Na Figura 3 é ilustrada a estratégia do controle preditivo por modelo. No primeiro instante de tempo (k), o controlador utiliza um modelo do processo e faz a previsão da variável controlada em um horizonte de tempo para que o erro entre a referência $r(k)$ e a variável controlada $y(k)$ seja zero. Depois, calcula uma sequência de ações de controle $u(k)$ em um horizonte de tempo para minimizar a função objetivo. Para isso, aplica-se, na planta, a primeira entrada da respectiva sequência ótima. Já no segundo instante de tempo ($k+1$), o controlador lê o retorno da variável controlada, refaz o cálculo de previsão e obtém uma nova sequência de sinais de controle para ser novamente enviado à planta. Esse processo é conhecido como estratégia de horizonte móvel, onde o controlador repete o cálculo a cada instante de tempo movendo-se as referências de tempo um passo à frente.

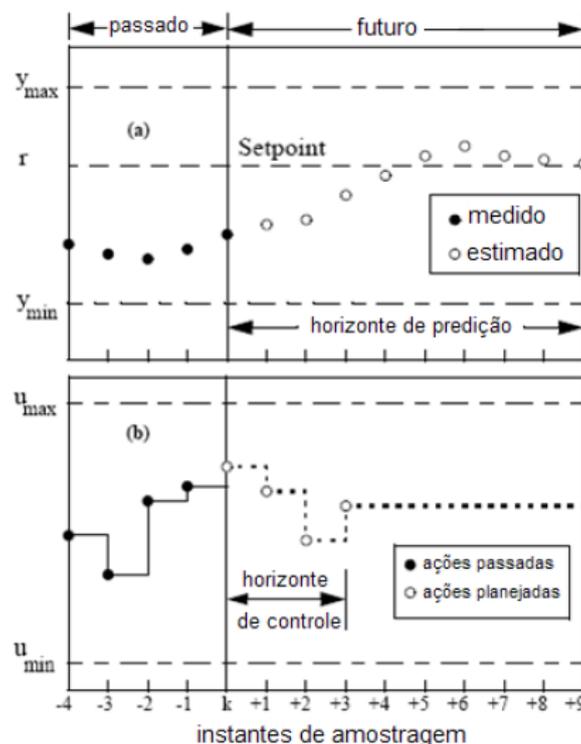


Figura 3. Estratégia MPC. (Fonte: Help da Toolbox MPC do Matlab)

O algoritmo de controle é expresso pela função J , onde os valores das variáveis manipuláveis são selecionados para minimizar a função de custo quadrática que considera a minimização dos erros futuros (Equação 3):

$$J = \sum_{j=1}^{H_p} [\hat{y}(k+j|t) - r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{H_u} \lambda [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (3)$$

onde, H_p é o horizonte de previsão definido como o período em que o erro deve ser zero e H_u é o horizonte de controle definido como o período estabelecido para o cálculo do conjunto de ações de controle. Além disso, o esforço de controle é descrito por Δu e a segunda função quadrática é ponderada por um parâmetro de sintonia chamado coeficiente de supressão de movimento, λ .

Uma das principais vantagens do MPC é a inclusão de restrições das variáveis no desenvolvimento do controlador. Na Figura 3, y_{\min} e y_{\max} representam os limites para a variável controlada e u_{\min} e u_{\max} representam os limites para a variável manipulada.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como ferramenta para este trabalho, utilizou-se o *software* Matlab. A partir dele, foi possível realizar as simulações necessárias para a identificação do processo para o desenvolvimento do controlador PID e MPC.

Após a modelagem da planta de moagem no simulador descrito em [7], realizou-se a identificação do sistema, que é o processo de construir um modelo matemático de um sistema dinâmico por meio de observações de suas entradas e saídas ao qual a saída em qualquer instante depende de seu histórico e não apenas da entrada presente [9].

Para a modelagem da planta de moagem estudada, foram selecionadas três variáveis controladas:

- O tamanho de partícula do produto final (granulometria);
- O percentual de sólidos da polpa;
- Carga circulante.

Também foram selecionadas três variáveis manipuladas:

- Taxa de adição de minério;
- Taxa de adição de água no moinho;
- Taxa de adição de água na caixa (controle da densidade).

Definidas as variáveis, foi aplicada a função degrau unitário nas variáveis manipuladas de forma independente e observadas as respostas das variáveis controladas a fim de obter a curva de reação. Assim, obtiveram-se nove respostas em malha aberta. A representação das curvas de reação para a variação positiva de +1 m³/min na vazão de água da alimentação do moinho está ilustrada na Figura 4. De acordo com as curvas obtidas, consideraram-se dinâmicas de primeira ordem. As curvas de reação para a variação das demais variáveis manipuladas seguem o mesmo padrão.

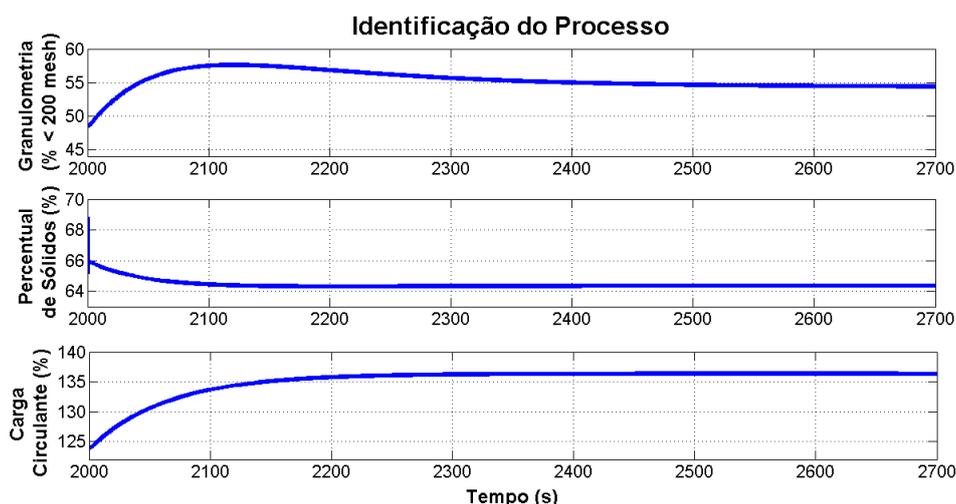


Figura 4. Variação positiva de +1 m³/min na vazão de água da alimentação do moinho; na ordem, temos: resposta ao degrau da granulometria (%), resposta ao degrau do percentual de sólidos (%) e resposta ao degrau da carga circulante (%).

Ao final dos experimentos e coleta dos dados, um modelo com três entradas e três saídas foi obtido com base nas curvas de reação das variáveis controladas. V_a , V_m e D_p indicam as variáveis manipuladas, nomeadas vazão de água de alimentação do moinho, vazão de minério de alimentação do moinho e densidade da polpa,

respectivamente, e G_p , P_s e C_c denotam as variáveis controladas, nomeadas granulometria do produto final, percentual de sólidos e carga circulante, respectivamente. O modelo do circuito de moagem pode ser escrito pelos vetores de saída $Y = [G_p(s) \ P_s(s) \ C_c(s)]^T$, de entrada $U = [V_a(s) \ V_m(s) \ D_p(s)]^T$, e por

$$G = \begin{bmatrix} \frac{0,248}{s+0,013} & \frac{0,385}{s+0,020} & \frac{-0,988}{s+0,027} \\ \frac{-5,416}{s+0,252} & \frac{3,411}{s+0,122} & \frac{4,533}{s+0,110} \\ \frac{0,685}{s+0,015} & \frac{-0,811}{s+0,017} & \frac{10,680}{s+0,122} \end{bmatrix} \quad (4)$$

O modelo linear em (4) é utilizado para realizar as predições do controle preditivo. Também é utilizado como base no projeto dos controladores PID.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados os resultados da aplicação do controle PID e do controle MPC, numa camada acima dos PID's, no circuito de moagem simulado. Foram aplicadas perturbações no circuito sendo controlado por ambas as propostas de controle para que fosse possível avaliar qual é o controle ideal para ser aplicado à planta de moagem real.

5.1 Controle PID

Para aplicar o controle PID no simulador de moagem, utilizaram-se os modelos da planta apresentados na seção 4. A partir desses modelos aplicou-se o método de sintonia IMC para identificar os valores dos parâmetros de sintonia k_p , k_i e k_d . As malhas criadas foram: controle da taxa de alimentação de água no moinho, controle da taxa de alimentação de minério, controle de densidade pela taxa de água na caixa da descarga do moinho e controle de nível da caixa. Os valores dos parâmetros são apresentados na Tabela 1. O valor de k_d para todas as malhas é 0.

Tabela 1. Parâmetros de Sintonia

Malhas	Parâmetros
Taxa de Água na Alimentação	Kp: 1,0 Ki: 10,0
Taxa de Minério na Alimentação	Kp: 0,0 Ki: 3,0
Densidade (pela taxa de água na caixa)	Kp: 0,1 Ki: 6,0
Nível da Caixa	Kp: 4,0 Ki: 0,5

Os valores de sintonia são os mesmos usados para o caso estudado de MPC.

5.2 Aplicação do MPC e Simulações

Para aplicar o MPC na planta, após a identificação do modelo do processo, desenvolveu-se o controlador preditivo 3x3 utilizando o MPC Toolbox do MatLab seguindo a arquitetura da Figura 5. Como parâmetros de sintonia têm-se: horizonte

de predição $H_p = 30$, horizonte de controle $H_c = 5$ e tempo de amostragem $T = 1s$. Os pesos P das variáveis manipuladas foram considerados $P = 1$. As restrições nas variáveis manipuladas e nas variáveis controladas são definidas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

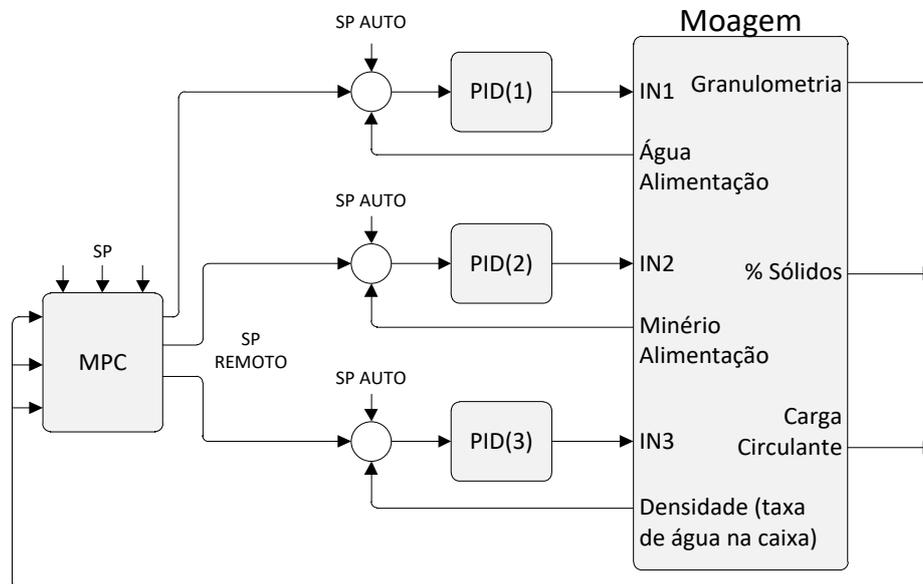


Figura 5. Arquitetura de controle da moagem com MPC.

Tabela 2. Restrições das Variáveis Manipuladas

Var. Manipuladas	Restrições
Vazão de Água	Mínimo de 2 m ³ /min Máximo de 15 m ³ /min
Vazão de Minério	Mínimo de 2 t/min Máximo de 15 t/min
Densidade	Mínimo de 1.3 t/m ³ Máximo de 2.5 t/m ³

Tabela 3. Restrições das Variáveis Controladas

Var. Controladas	Restrições
Granulometria	Mínimo de 45 % Máximo de 75 %
Percentual de Sólidos	Mínimo de 70 % Máximo de 90 %
Carga Circulante	Mínimo de 120 % Máximo de 135 %

Como sinais de referência (SP) para as variáveis controladas foram considerados os seguintes valores:

SP - granulometria = 64 % < 200 mesh

SP - percentual de sólidos = 74 %

SP - carga circulante = 127 %

Foi definida a seguinte estratégia para a simulação da planta com MPC: após 250 segundos de simulação aplicou-se um degrau de amplitude 6 no *setpoint* de granulometria, aos 500 segundos aplicou-se um degrau de amplitude 6 no *setpoint* de percentual de sólidos e aos 750 segundos aplicou-se um degrau negativo de amplitude 6 no *setpoint* de carga circulante. A partir da Figura 6 e 7 é possível observar o comportamento das variáveis controladas e das variáveis manipuladas do circuito de moagem, respectivamente.

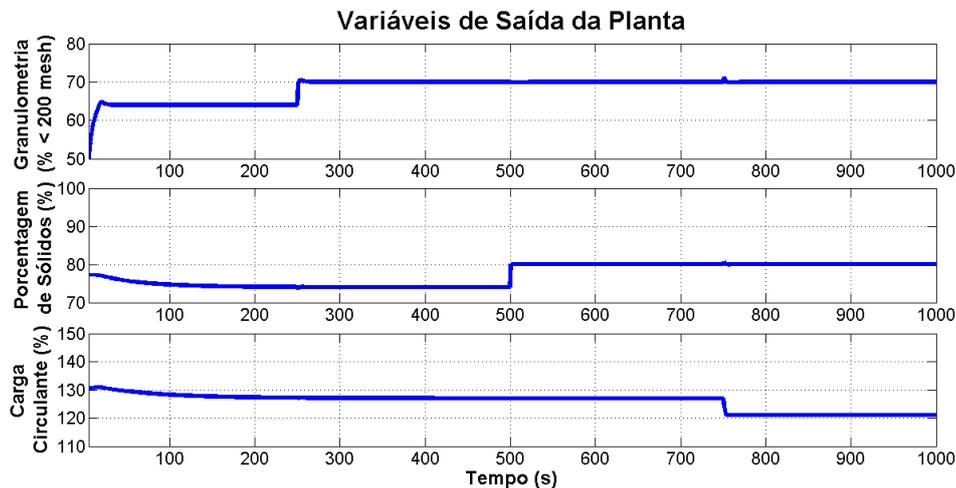


Figura 6. Variáveis controladas com a aplicação do MPC.

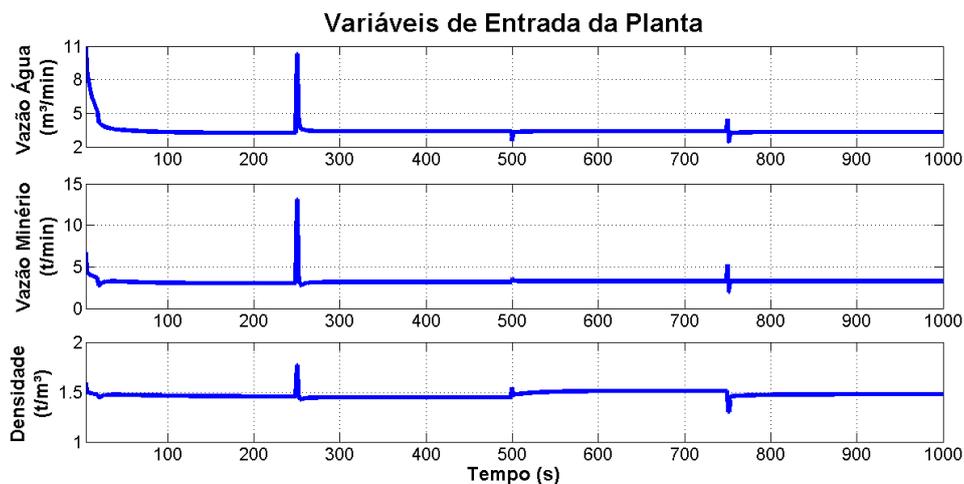


Figura 7. Variáveis manipuladas com a aplicação do MPC.

Analisando as Figuras 6 e 7, observa-se que ao alterar o SP de qualquer variável controlada, o MPC é capaz de manipular as variáveis de entrada da planta a fim de manter uma relação que conserve o sistema estável no ponto de operação desejado, possibilitando que o circuito de moagem trabalhe com suas principais variáveis controladas em faixas próximas de seus valores ótimos, o que não seria possível com o circuito controlado apenas por controladores PID. Segundo Pomerleau et al [10] o desempenho do PID é limitado para sistemas multivariáveis, onde as interações entre variáveis controladas e manipuladas podem resultar em indesejáveis interações quando as manipuladas não são corretamente selecionadas. Também foi simulado o cenário em que há presença de perturbação na granulometria do minério de entrada. Nesse caso é possível fazer uma comparação de desempenho entre o MPC e o PID. Para isso, aplicou-se uma perturbação no

sistema, em que a granulometria na alimentação foi aumentada, ou seja, o minério tornou-se mais grosseiro. No instante $t = 2000$ segundos, a parcela de minério menor que $74 \mu\text{m}$ foi reduzida de 12,6% para 5,0%. A Figura 8 ilustra o comportamento da granulometria ($\% < 200 \text{ mesh}$) com o circuito de moagem sendo controlado por PID e por MPC com *setpoint* ajustado em 50%.

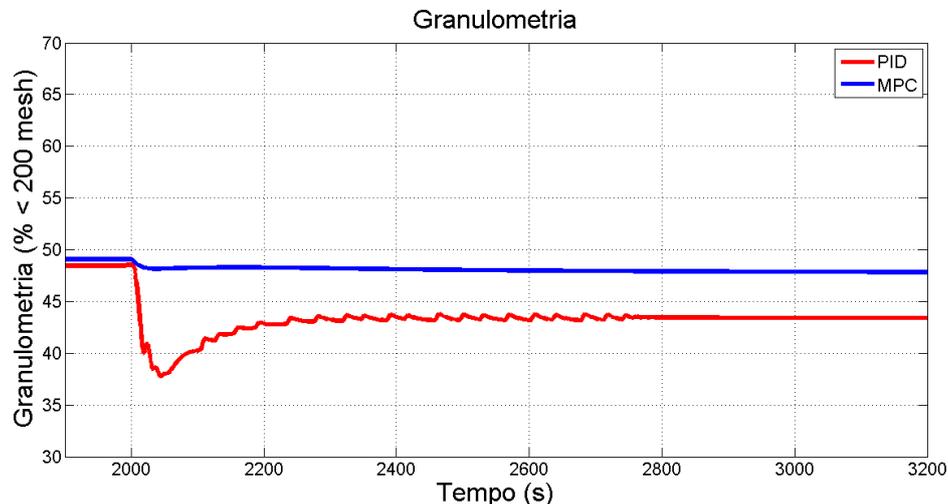


Figura 8. Comportamento da granulometria do minério produzido ao se aplicar a perturbação.

A partir da análise da Figura 8, após a aplicação da perturbação, no que depende do controle para a manutenção da variável controlada em seu valor ótimo, o comportamento da granulometria sendo controlada pelo MPC foi mais estável, ou seja, houve apenas uma pequena alteração no valor da variável em relação ao *setpoint* estabelecido de 50%. Já o PID obteve maior queda no valor da granulometria do produto final, demonstrando que possui desempenho limitado em operações de sistemas multivariáveis, sendo que o ajuste da granulometria só seria feito quando algum operador manipulasse os *setpoints* das três malhas de controle distintas para obter um desempenho aproximado ao do MPC.

Observa-se também que o MPC trabalha com eficiência utilizando restrições nas variáveis manipuladas e controladas, além de utilizar sua função de custo, que penaliza variações na ação de controle para impossibilitar variações altas nas variáveis manipuladas.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a aplicação de um controlador preditivo por modelo em um simulador de circuito de moagem. Para isso, apresentou o projeto e aplicação do controlador MPC. Os resultados das diversas simulações realizadas permitiram a avaliação prévia do comportamento do sistema quando operado com o controlador projetado.

De acordo com os resultados obtidos, a aplicação do MPC ao circuito de moagem resultou em melhorias significativas no desempenho da planta se comparado com a aplicação do PID. Destaca-se a diferença significativa entre as duas soluções nos momentos em que a granulometria do minério foi modificada.

Como trabalho futuro pretende-se aplicar os conhecimentos adquiridos em MPC numa planta de moagem real.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Instituto Tecnológico Vale e da Universidade Federal de Ouro Preto pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, Vale S.A. e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 Chaves AP, Clarck AE. Britagem, Peneiramento e Moagem. São Paulo: Oficina de Textos. 5 ed. 2012.
- 2 Chen XS, Zhai JY, Li SH, Li Q. Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. Minerals Engineering. 2007; 20(11): 1099-1108.
- 3 Chen XS, Li SH, Zhai JY, Li Q. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit. Expert systems with Applications. 2009; 36(1): 716-723.
- 4 Ramasamy M, Narayanan SS, Rao CD. Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme. Journal of Process Control. 2005; 15(3): 273-283.
- 5 Ruel M. Fuzzy Logic Control on a SAG Mill. IFAC Proceedings Volumes, Vol. 46. 2013; pp. 282–287.
- 6 Camacho EF, Bordons C. Model Predictive Control. Springer-Verlag. London. 2007.
- 7 Sbárbaro D, Del Villar R. Advanced control and supervision of mineral processing plants. Springer Science & Business Media. 2010.
- 8 O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. World Scientific. 2009.
- 9 Ljung L. System Identification. Theory for the user. Prentice-Hall. New Jersey. 1987.
- 10 Pomerleau A, Hodouin D, Desbiens A, Gagnon E. A survey of grinding circuit control methods: from decentralized PID controllers to multivariable predictive controllers. Powder Technology. 2000; 108(2): 103-115.