

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE AVANÇADO APLICADAS A UM SIMULADOR DE CIRCUITO DE MOAGEM*

Modesto Pereira Júnior¹
Lucas Andery Reis²
Thiago Antônio Melo Euzébio³

Resumo

Neste artigo são analisadas estratégias de controle avançado em um simulador de circuito de moagem com moinho de bolas. O sistema estudado é de grande importância na mineração, uma vez que a moagem é a área da fragmentação que requer maiores investimentos, há maior gasto de energia e seu desempenho afeta diretamente a taxa de recuperação do mineral de interesse. O controle do circuito de moagem é desafiador por se tratar de um sistema multivariável, não-linear e por se caracterizar pela existência de forte acoplamento entre. Na indústria, grande parte desses circuitos é controlada apenas por PIDs. Nesses casos, quando há perturbações no sistema, tais como variação do tamanho das partículas na alimentação ou variação na dureza do minério, a interferência de operadores alterando *setpoints* é exigida para manter a estabilidade do sistema. Como alternativa à solução predominante, nesse artigo é estudado o projeto e aplicação de controladores fuzzy e controladores preditivo por modelo (MPC) em uma camada de controle acima dos PIDs existentes. Na análise dos resultados são discutidas as melhorias de robustez e desempenho obtidas com as aplicações propostas.

Palavras-chave: Controle Inteligente; Controle Fuzzy; Moinho de Bolas; MPC.

ADVANCED CONTROL STRATEGIES APPLIED TO A GRINDING CIRCUIT SIMULATOR

Abstract

In this paper are analyze advanced control strategies for a ball mill grinding circuit simulator. The system studied is of great importance in the mining, since grinding is the area of fragmentation that requires larger investments, there is a greater energy expenditure and it is performance directly affects the rate of recovery of the mineral of interest. The control of the grinding circuit is challenging because it is a multivariable, nonlinear system and is characterized by the existence of strong coupling between variables. In industry, most of these circuits is controlled only by PIDs. In such cases, when there are disturbances in the system, such as particle size variation in feed or variation in ore hardness, the interference of operators changing set points is required to maintain system stability. As an alternative to the predominant solution, in this paper, we study the design and application of fuzzy and MPC controllers in a control layer above the existing PIDs. In the analysis of the results are discussed the improvements of robustness and performance obtained with the proposed applications.

Keywords: Ball Mill; Fuzzy Control; MPC; Smart Control.

¹ Engenheiro Eletricista, M. Sc., Engenheiro de Manutenção, Yara Fertilizantes, Paulínia, São Paulo, Brasil.

² Engenheiro de Controle e Automação, M. Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Eletricista, D. Sc., Pesquisador, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A moagem representa uma importante operação unitária no processamento de minerais em plantas de concentração. O tamanho das partículas do produto tem grande influência na taxa de recuperação dos minerais de interesse. O circuito do moinho de bolas é essencialmente um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), caracterizado pelo acoplamento entre as variáveis do processo, não-linearidades e atrasos de tempo. O controle estável do circuito de moagem é geralmente interrompido por perturbações, tais como o tamanho das partículas na alimentação e mudança na dureza do minério. Segundo Chaves e Clark [1], no processamento de minérios de cobre, desde a mina até o embarque do concentrado, essa operação unitária contribui com 40% dos custos totais.

Alguns trabalhos de pesquisa foram publicados sobre estratégias de controle para circuitos de moagem. Esses métodos de controle envolvem controle adaptativo baseado em matriz dinâmica, controle preditivo por modelo (MPC) e controle fuzzy (Chen [2], Ramasamy, Narayanan & Rao [3], Chen [4] e Ruel [5]). Embora algumas estratégias de controle avançado tenham sido relatadas na literatura de controle, tanto em processos simulados quanto em níveis experimentais, poucas delas operam atualmente na indústria devido à complexa dinâmica do processo e graves perturbações nos circuitos de moagem (Chen [2]).

O uso de um simulador dinâmico de moagem permite diversas vantagens ao comparativo de estratégias de controle. Pode-se, por exemplo, introduzir perturbações severas ao sistema e variações repentinas do tipo de minério processado no moinho. É possível também modificar características físicas dos equipamentos e o número de variáveis de processo e manipuladas. Todas essas alterações são feitas em tempo de simulação, a custo zero e sem risco de danos aos equipamentos.

Nesse artigo três estratégias de controle são aplicadas a um sistema de moagem simulado. A primeira estratégia consiste no uso de controladores PID, cuja aplicação é a mais comum na indústria. As duas outras estratégias estudadas são Controle Fuzzy e MPC. Em comum, essas duas estratégias são classificadas como avançadas e aplicadas em uma camada de controle acima da camada regulatória, onde os PIDs mantêm sua ação.

Esse trabalho tem por objetivo analisar o desempenho do circuito simulado de moagem ao se aplicar controle PID, controle fuzzy e MPC. Esta análise apresentará o controle mais eficaz, robusto e confiável quando aplicado ao circuito real estudado. O artigo está estruturado da seguinte forma: o circuito de moagem é apresentado na seção 2. Na seção 3 é apresentado o procedimento de identificação e modelagem do processo. Na seção 4 são descritos os controladores PID, fuzzy e MPC. Os resultados alcançados são apresentados na seção 5. Na seção 6, apresentamos as conclusões.

2 O CIRCUITO DE MOAGEM

A moagem compreende as operações de cominuição de partículas com tamanhos menores que 19 mm e é efetuada pelos mecanismos de arredondamento, quebra de pontas e abrasão. Os objetivos da moagem, como operação unitária de tratamento de minérios, são: liberação de espécies minerais, adequação de produtos às especificações granulométricas, aumento da área de superfície específica para facilitar a reação química em processos hidrometalúrgicos.

O simulador utilizado para o desenvolvimento deste trabalho compreende um subconjunto de modelos descritos no livro "Controle Avançado e Supervisão de Plantas de Processamento Mineral" em Sbárbaro& Del Villar[6]. Trata-se de um simulador dinâmico, em que se pode investigar o efeito de alterações na moabilidade do minério e outros parâmetros para o sistema de moagem. A grande vantagem de se utilizar um simulador dinâmico é que podemos obter a resposta transitória do circuito e alterar todos os parâmetros, desde parâmetros construtivos dos equipamentos até parâmetros do minério.

O circuito de moagem simulado consiste em um moinho de bolas, um tanque, e um hidrociclone como ilustrado na Figura 1. A moagem ocorre no interior do moinho, pela ação de bolas de aço sobre o minério. É adicionada água junto à alimentação de minério, para se criar uma polpa, de forma a promover a moagem e um fluxo através do moinho. O tanque serve para ajustar a densidade da polpa e promover sua homogeneização. Uma bomba de polpa com velocidade variável é utilizada para transferir o material até o hidrociclone, que realiza a classificação do produto.

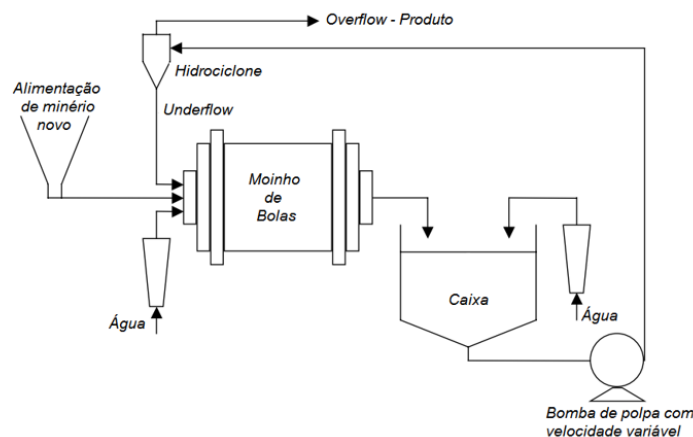


Figura 1. Circuito de moagem estudado.

No simulador utilizado, o modelo para moinho de bolas baseia-se no balanço de massa para o material em cada intervalo de tamanho, seguindo o princípio da mistura perfeita(Sbárbaro& Del Villar[6]). Essas equações podem ser escritas em forma de vetor como:

$$\frac{dm(t)}{dt} = f(t) - p(t) - \gamma(t)(\phi[S - BS]m(t)) \quad (1)$$

onde $m(t)$ é o vetor de fração de massa no interior do moinho, $f(t)$ é o vetor de fração de massa na carga do moinho, $p(t)$ é o vetor de fração de massa do produto da moagem, γ é a dureza do minério, ϕ representa a fração de primeira ordem da cinética assumida, B e S são as matrizes de quebra.

A distribuição granulométrica é a variável mais importante a ser controlada em um circuito de moagem. O minério precisa atingir uma determinada granulometria, para que minerais de interesse sejam liberados, que serão recuperados na etapa de flotação, por exemplo. No entanto, uma granulometria muito menor que aquela de liberação pode trazer algumas desvantagens. Além do maior consumo de energia na moagem, partículas muito finas são difíceis de serem recuperadas na etapa de concentração seguinte.

3 IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM DO PROCESSO

Identificação 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 (Ljung, [7]).

Para a modelagem da planta de moagem estudada, foram selecionadas três variáveis controladas, isto é, o tamanho de partícula do produto final (granulometria), o percentual de sólidos da polpa e a carga circulante. Também foram selecionadas três variáveis manipuladas, sendo taxa de adição de minério, taxa de adição de água no moinho e a 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 $+1 \text{ m}^3/\text{min}$ na vazão de água da alimentação do moinho está ilustrada na Figura 2, onde se tem curvas com característica de primeira ordem e com sobressinal. As curvas de reação para a variação das demais variáveis manipuladas seguem o mesmo padrão.

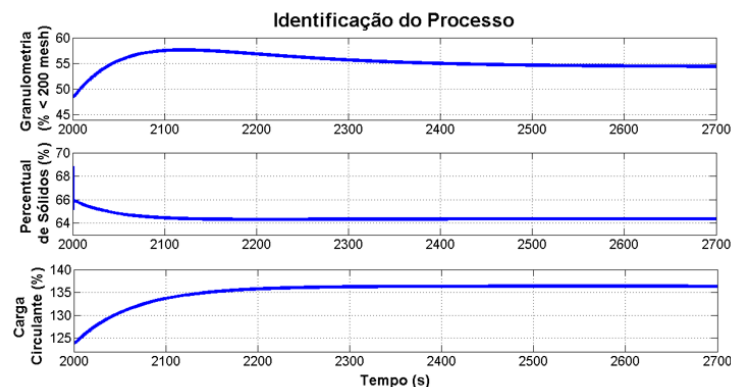


Figura 2. Variação positiva de $+1 \text{ m}^3/\text{min}$ na vazão de água da alimentação do moinho; na ordem, temos: resposta ao degrau da granulometria (%), resposta ao degrau do percentual de sólidos (%) e resposta ao degrau da carga circulante (%).

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 da seguinte forma $Y = GU$, onde o vetor de saída $Y = [G_p(s) \ P_s(s) \ C_c(s)]^T$, o vetor de entrada $U = [V_a(s) \ V_m(s) \ D_p(s)]^T$, e

$$G = \begin{bmatrix} 0,248 & 0,385 & -0,988 \\ s + 0,013s + 0,020s + 0,027 \\ -5,416 & 3,411 & 4,533 \\ s + 0,252s + 0,122s + 0,110 \\ 0,685 & -0,811 & 10,680 \\ s + 0,015s + 0,017s + 0,122 \end{bmatrix} \quad (2)$$

4 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE APLICADAS

Nesta seção é descrito o controle PID e as duas estratégias de controle avançado aplicadas ao circuito de moagem simulado. O controle fuzzy, que introduz a forma humana de pensar em sistemas de controle, utilizando variáveis linguísticas e regras. O controle preditivo por modelo (MPC), que é uma família de métodos que faz 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.

4.1 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, $e(t) = r(t) - y(t)$. Deste modo, a lei de controle do controlador da Figura 3, em tempo contínuo, é descrita pela equação:

$$C = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

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), entre outros. Uma compilação de métodos de sintonia PID pode ser visto em O'Dwyer[8].

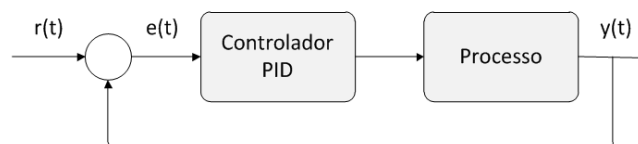


Figura 3. Aplicação do controle PID em malha fechada.

4.2 Controle Fuzzy

A lógica fuzzy é uma técnica que tenta emular sistematicamente e matematicamente o raciocínio humano e as tomadas de decisão. O conceito de conjuntos fuzzy foi introduzido em 1965 por Zadeh [9]. Seu desenvolvimento foi motivado pela necessidade de uma ferramenta conceitual que pudesse expressar e tratar incertezas e imprecisões (Oliveira, Braga e Almeida, [10]).

Os controladores industriais baseados em lógica fuzzy podem ser projetados a partir do conhecimento experimental de operadores humanos. A partir de um conjunto de regras linguísticas que descrevem as estratégias de controle, um algoritmo é construído onde as palavras são definidas como conjunto fuzzy. As principais vantagens desta aproximação são a possibilidade de implementar regras baseadas na experiência, na intuição, na heurística e no fato de que não é necessário um modelo do processo (Balbino, [11]).

Um diagrama de blocos de um controlador *fuzzy* é ilustrado na Figura 4. O controlador é composto por quatro elementos: Interface de Fuzzyficação, Base de Regras, Mecanismos de Inferência e Interface de Defuzzyficação.

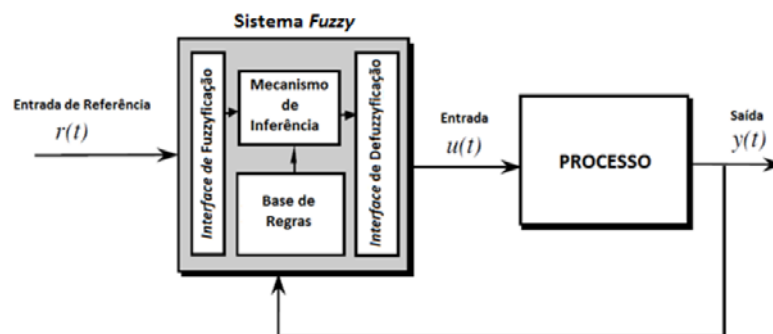


Figura 4. Diagrama de blocos de um controlador *fuzzy*.

A interface de fuzzyficação recebe os valores das variáveis de entrada, frequentemente grandezas contínuas no domínio dos números reais provenientes de sensores, e condicionam os valores para um universo de discurso normalizado, transformando números reais em valores discretos com um grau de pertinência em conjuntos fuzzy (Shaw e Simões, [12]).

A base de regras consiste em um conjunto de regras do tipo SE <condição> ENTÃO <consequência>. Essas regras podem ser formuladas com base no conhecimento do especialista do processo. É a base de regras que caracteriza a estratégia de controle (Passino e Yourkovich, [13]).

O mecanismo de inferência é o componente do controlador em que ocorrem as operações com os conjuntos fuzzy, as relações e composições fuzzy. Há combinação entre os antecedentes (valores fuzzyficados das variáveis do processo) com os consequentes das regras para gerar o conjunto fuzzy de saída, conforme o procedimento de inferência adotado (Rezende, [14]).

A Interface de defuzzyficação converte os resultados da inferência fuzzy para ações de controle não fuzzy. O objetivo é obter-se um único valor discreto utilizável numa ação de controle concreta no mundo real.

4.3 Controle Preditivo por Modelo

Segundo Camacho e Bordons[15] 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. 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 5 é ilustrada uma representação da estratégia do controle preditivo por modelo. No primeiro instante de tempo (k), o controlador utiliza um modelo do processo e faz a predição 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 predição e obtém uma 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.

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:

$$J = \sum_{j=1}^{H_p} [\hat{y}(k+j|t) - r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{H_u} \lambda [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (7)$$

onde, H_p é o horizonte de predição 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 5, 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.

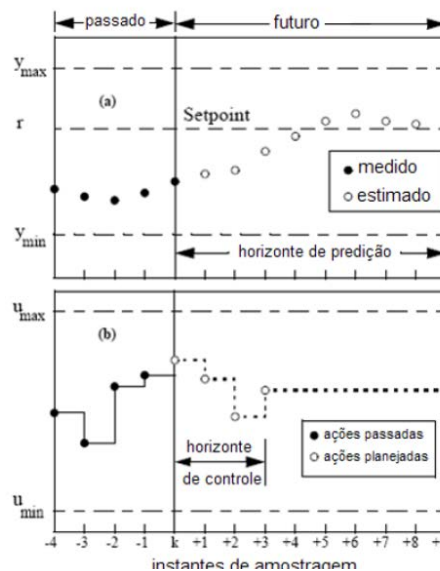


Figura 5. Estratégia MPC (Fonte: Help da Toolbox MPC do Matlab).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o circuito de moagem em estudo, foram aplicados o controlador fuzzy e o controlador MPC, variando os set point dos controladores PID. Para verificar o

desempenho destes controladores foi realizada uma análise considerando os controladores PIDs com setpoint fixo e aplicando-se perturbações no tamanho das partículas na alimentação. O objetivo de introduzir essa perturbação no circuito foi verificar o comportamento da planta controlada por cada um dos controladores já citados. No caso do controlador MPC, ainda aplicou-se perturbações na variável taxa de alimentação de minério e foram feitas variações nos setpoints das variáveis controladas.

5.1 Aplicação do controle PID

Para aplicar o controle PID no simulador de moagem, utilizaram-se os modelos da planta apresentados na seção 3. 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	Kp	Ki
Taxa de água na alimentação	1,0	10,0
Taxa de minério na alimentação	0,0	3,0
Densidade (pela taxa de água na caixa)	0,1	6,0
Nível da caixa	4,0	0,5

5.2 Aplicação do controle Fuzzy

O desenvolvimento do controle fuzzy foi realizado por meio do Fuzzy Logic Toolbox do MatLab. Foram desenvolvidos três controladores fuzzy, que passaram a manipular os valores de setpoint dos controladores PID de taxa de adição de minério, taxa de adição de água no moinho e taxa de adição de água na caixa.

As funções de pertinência para as variáveis de entrada e de saída foram obtidas experimentalmente, sendo ajustadas de forma empírica, de acordo com o sistema analisado.

As regras utilizadas para inferência nos controladores fuzzy foram baseadas no resultado de entrevistas com operadores de sala de controle. Esses operadores possuem grande experiência em plantas de beneficiamento de minério e manipulam os setpoints observando o resultado nas variáveis de controle. A definição dos intervalos para fuzzyficação dos valores reais das variáveis também foi realizado baseado no conhecimento da dinâmica do processo. As regras estabelecidas para o controlador fuzzy da taxa de adição de água no moinho são mostradas na Tabela 2. Este controlador tem o objetivo de manter o percentual de sólidos na polpa constante, mesmo que a taxa de adição de minério varie.

Tabela 2. Regras para o controlador fuzzy taxa de adição de água no moinho

1	Se taxa de adição de minério é baixa, então taxa de adição de água no moinho é muito baixa.
2	Se taxa de adição de minério é média, então taxa de adição de água no moinho é baixa.
3	Se taxa de adição de minério é alta, então taxa de adição de água no moinho é média.

Foram realizadas simulações no circuito ilustrado pela Figura 1. No instante $t = 2000$ s foi aplicada uma perturbação no sistema, em que a granulometria na alimentação foi aumentada, ou seja, o minério que era adicionado ao circuito tornou-se mais grosseiro. Antes do instante $t = 2000$ s 12,6% do minério na alimentação tinha tamanho menor ou igual a $74 \mu\text{m}$. Após $t = 2000$ s apenas 5,0% do minério adicionado ao circuito tinha tamanho menor ou igual a $74 \mu\text{m}$. Para mensurar os efeitos da perturbação foi considerado o tamanho das partículas esperado no produto final, que é a quantidade de material que consegue passar por uma malha de peneira com abertura de 200 mesh ou $74 \mu\text{m}$. As Figuras 6, 7 e 8 ilustram o comportamento das principais variáveis.

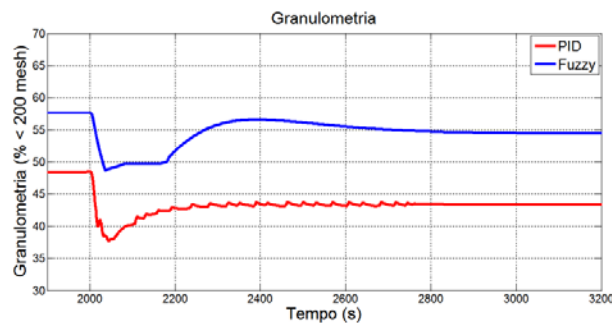


Figura 6. Comportamento da granulometria do minério produzido ao se aplicar a perturbação.

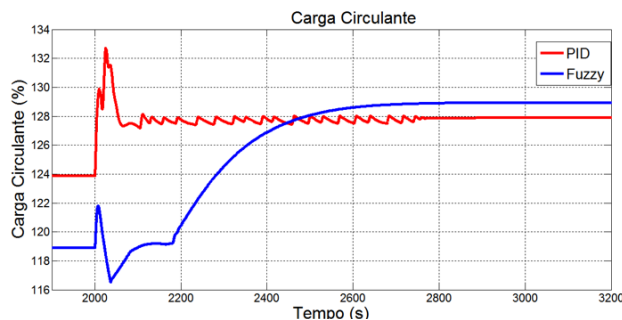


Figura 7. Comportamento da carga circulante no circuito ao se aplicar a perturbação.

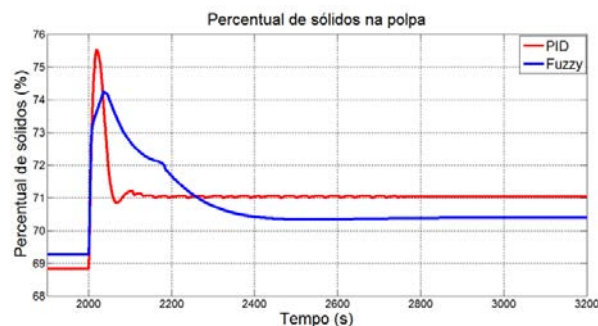


Figura 8. Comportamento do percentual de sólidos na polpa ao se aplicar a perturbação.

Observa-se pela da Figura 6 que a variável distribuição granulométrica, teve um resultado superior quando estava atuando sobre a planta o controlador fuzzy. O resultado do controlador fuzzy foi cerca de 10% melhor para a variável granulometria comparado ao caso em que apenas os PIDs atuam com os setpoint fixos. Também foi possível observar que após a aplicação da perturbação, o controlador fuzzy obteve menores oscilações nas variáveis granulometria e carga circulante, como ilustrado nas Figuras 6 e 7.

O controlador PID apresentou um valor de 0,6 pontos percentuais maior para a variável percentual de sólidos na polpa em relação ao controlador fuzzy, após a aplicação da perturbação, conforme ilustrado na Figura 8. O melhor desempenho dessa variável com o controlador PID, de forma isolada, não é capaz de provocar um aumento na granulometria, já que o circuito de moagem possui forte acoplamento entre as variáveis.

5.3 Aplicação do MPC

Para aplicar o MPC na planta, após a identificação do modelo do processo, desenvolveu-se o controlador preditivo utilizando o MPC Toolbox do MatLab seguindo a arquitetura da Figura 9. 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 na Tabela 3, respectivamente. Os sinais de referência (SP) para as variáveis controladas são definidos na Tabela 4.

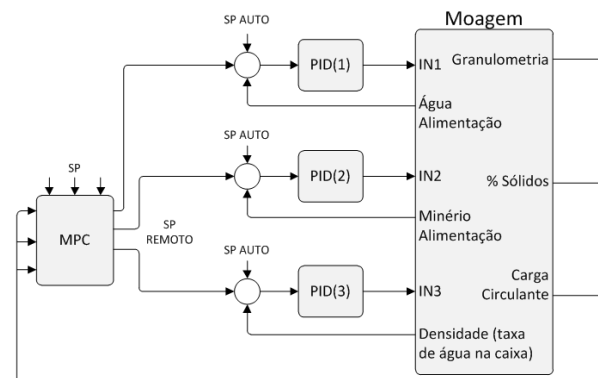


Figura 9. Arquitetura de controle da moagem com MPC.

Tabela 3. Restrições das variáveis controladas e manipuladas

Variáveis	Mínimo	Máximo
Vazão de água	2 m ³ /min	15 m ³ /min
Vazão de minério	2 t/min	15 t/min
Densidade	1,3 t/m ³	2,5 t/m ³
Granulometria	45 %	75 %
Percentual de sólidos	70 %	90 %
Carga circulante	120 %	135 %

Tabela 4. Sinais de referência (SP) para as variáveis controladas

Granulometria	64% < 200 mesh.
Percentual de sólidos	74 %.
Carga circulante	127 %.

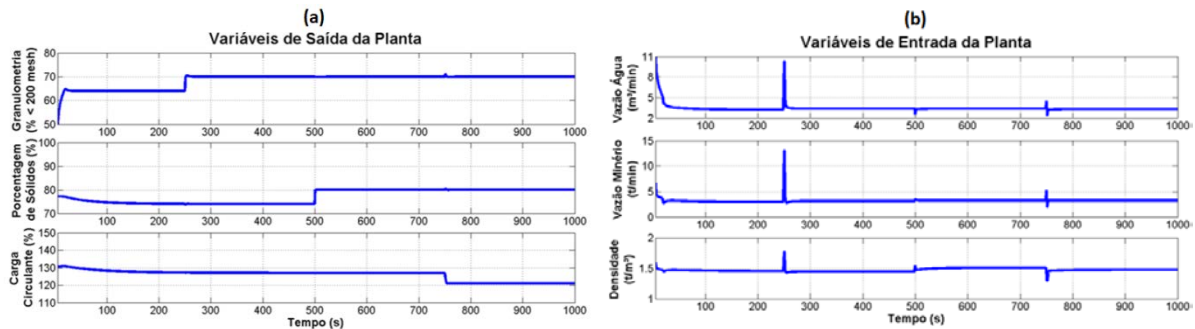


Figura 10.(a) Variáveis controladas com a aplicação do MPC e (b) variáveis manipuladas com a aplicação do MPC.

Analisando a Figura 10 (a) e (b), 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[16] 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. Essa é a mesma variação de perturbação considerada no caso anterior do controle fuzzy, onde, 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 11 ilustra o comportamento da granulometria (% < 200 mesh) com o circuito de moagem sendo controlado por PID e por MPC com setpoint ajustado em 50%.

A partir da Figura 10 (a) e (b) é possível observar o comportamento das variáveis controladas e das variáveis manipuladas do circuito de moagem, respectivamente.

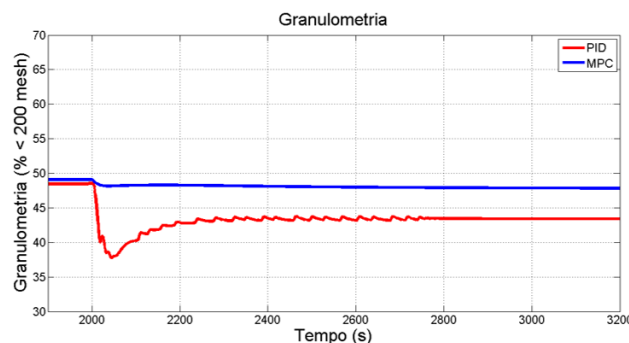


Figura 11.Comportamento da granulometria do minério produzido ao se aplicar a perturbação.

A partir da análise da Figura 11, 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 estratégias de controle avançado em um simulador de circuito de moagem. Para isso, apresentou-se o projeto e aplicação do controle fuzzy e do controle preditivo por modelo. Os resultados das diversas simulações realizadas permitiram a avaliação prévia do comportamento do sistema quando operado com o controlador projetado.

A utilização das estratégias de controle avançado aplicadas ao circuito de moagem resultou em melhorias significativas no desempenho da planta se comparado com a aplicação do PID, as quais puderam ser observadas através dos gráficos de resposta das variáveis controladas, até mesmo na presença de perturbações.

REFERÊNCIAS

- 1 Chaves AP, Clarck AE. Britagem, Peneiramento e Moagem. São Paulo: Oficina de Textos;2012.
- 2 Chen X, Li S, Zhai J, Li Q. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit. Expert Systems with Applications. 2009;36(1):716–723.
- 3 Ramasamy M, Narayanan SS, Rao CDP. Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme. Journal of Process Control. 2005;15(3):273–283.
- 4 Chen X, Zhai J, Li S, Li Q. Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. Minerals Engineering, 2007;1099–1108.
- 5 Ruel M. Fuzzy Logic Control On a SAG Mill. IFAC Proceedings Volumes. 2013;46:282–287.
- 6 Sbárbaro D; Del Villar R. Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants. Londres: Springer, 2010.
- 7 Ljung L. System Identification: theory for the user. New Jersey: Prentice-Hall, 1987.
- 8 O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. World Scientific, 2009.
- 9 Zadeh LA. Fuzzy Sets. Information and Control. 1965;8:338-353.
- 10 Oliveira DN, Braga APS, Almeida OM. Fuzzy implementado em ladder com funções de pertinência descontínuas. Congresso Brasileiro de Automática – CBA. 2010;18:411-416.
- 11 Balbino ES. Aumento na eficiência de operação de máquina de mineração usando tecnologia fuzzy [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais;2007.
- 12 Shaw IS, Simões MG. Controle e modelagem Fuzzy. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2004.
- 13 Passino MK, Yourkovich S. Fuzzy control. Menlo Park: Addison-Wesley, 1997.

- 14 Rezende OLT. Uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas de conjunto gaseificador/combustor de biomassas. [tese de doutorado]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2012.
- 15 Camacho EF, Bordons C. Model Predictive Control. London: Springer-Verlag, 2007.
- 16 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;108:103–115.