

CONTROLE PREDITIVO NÃO LINEAR DE CIRCUITO DE MOAGEM A SECO¹

Guilherme Miranda Kallemback²

Amit Bhaya³

Luís Marcelo Marques Tavares⁴

Resumo

Importantes avanços têm sido realizados na área de controle de processos nas últimas décadas, sobretudo no desenvolvimento de sistemas avançados de controle. Entretanto, a sua utilização no controle da moagem é, surpreendentemente, limitada, sendo que, algumas ferramentas, como o controle preditivo não linear (NMPC) sequer têm sido aplicadas. No caso do NMPC isso se deve à pouca experiência com a aplicação da técnica na área e disponibilidade de sistemas de controle. O presente trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de controle preditivo visando a otimização de circuito de moagem a seco contendo moinho de bolas e classificador dinâmico. A partir de um modelo matemático previamente estabelecido para o circuito, foram encontradas as condições operacionais ótimas do sistema, como o grau de enchimento e a frequência de rotações do moinho de bolas, que maximizam a produção do circuito de moagem. As simulações mostram que o controle preditivo proposto se mostrou mais eficiente que o controle clássico (PID), não apenas pela robustez em lidar com ruídos e perturbações inerentes ao processo, mas também pelo aumento significativo da capacidade produtiva do circuito.

Palavras-chave: Controle; Moagem; Otimização

NONLINEAR PREDICTIVE CONTROL OF A DRY GRINDING CIRCUIT

Abstract

Important advances have been made in the field of process control in the last few decades, in special regarding the development of advanced control systems. However, their application in the control of grinding circuits is, surprisingly, still limited. Indeed, some tools, such as predictive nonlinear model control (NMPC) have not yet been even applied. In the case of NMPC this is due to the limited experience accumulated so far in the application of the technique in grinding as well as the availability of such control systems. The present work deals with the development of a predictive control system aiming to optimize the economic aspects of the ball mill grinding process. From a previously fitted model for the circuit, the optimal settings for the operating conditions, such as ball filling and ball mill speed, were identified. Simulations showed that the proposed predictive control was more efficient than the classic controller, not just in terms of robustness to deal with noise and the disturbances that are inherent in the process, but also because of the significant gain in productive capacity of the circuit.

Key words: Control; Grinding; Optimization.

¹ Contribuição técnica ao 16º Seminário de Automação e TI Industrial, 18 a 21 de setembro de 2012, Belo Horizonte, MG.

² Engenheiro de controle e automação, M.Sc. (VALE S.A.).

³ Engenheiro elétrico, M.Sc., Ph.D., Professor Titular (Programa de Engenharia Elétrica, COPPE-UFRJ)

⁴ Engenheiro de minas, M.Sc., Ph.D., Professor Associado (Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE-UFRJ)

1 INTRODUÇÃO

A moagem em moinho de bolas é uma das operações mais importantes em usinas de processamento mineral. A distribuição de tamanhos de partículas do produto da moagem tem grande influência sobre a recuperação dos minerais valiosos, realizada em processos subsequentes. Estima-se que os circuitos industriais de moagem normalmente são responsáveis por cerca de 50% do consumo total com energia de uma usina de processamento mineral, porém com eficiência energética estimada em apenas 10%, na maioria dos casos.⁽¹⁾

A moagem a seco é uma variante importante da moagem em moinhos de bolas. Ela encontra importantes aplicações na moagem de clínquer e escória para a fabricação de cimento e a de vários minerais industriais. Como são frequentemente responsáveis pela geração do produto final, quaisquer distúrbios no processo não adequadamente controlados resultarão na produção de material fora das especificações comerciais, resultando em prejuízo na operação.

Importantes avanços têm sido realizados na área de controle de processos nas últimas décadas,⁽²⁾ sobretudo no desenvolvimento de sistemas avançados de controle. Entretanto, a sua utilização no controle da moagem ainda é limitada, sendo que, algumas ferramentas, como o controle preditivo não linear (NMPC) sequer têm sido aplicadas. No caso do NMPC isso se deve, principalmente, à limitada experiência com a aplicação da técnica na área e disponibilidade de sistemas de controle.

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de controle que visa otimizar índices de desempenho adequadamente escolhidos para o processo não linear de moagem, demonstrando que ele poderá servir como arcabouço para o controle em tempo real da moagem em diferentes segmentos da indústria.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA MOAGEM E DA CLASSIFICAÇÃO A SECO

O Modelo do Balanço Populacional (MBP) é a ferramenta utilizada no presente trabalho na descrição quantitativa do processo de moagem em moinho de bolas a seco. A modelagem matemática de qualquer fenômeno físico demanda a adoção de hipóteses de simplificação, sendo que nesse trabalho são adotadas as hipóteses clássicas da literatura,⁽³⁾ as quais são: a variável tamanho de partículas é descrita de forma discretizada; as taxa de quebra de partículas podem ser adequadamente descritas considerando cinética de primeira ordem; o moinho de bolas pode ser descrito como um reator de mistura perfeita com classificação interna; a taxa de descarga do moinho pode ser adequadamente descrita pela relação $w_{out,i}(t) = d_i m_i(t)$.⁽⁴⁾ na qual, d_i é o coeficiente de classificação interna na classe i , $m_i(t)$ é a massa no interior do moinho sujeita a transporte na classe i . Considerando N classes de tamanhos, a representação matricial do MBP da moagem é

$$\frac{d[\mathbf{m}(t)]}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} -s_1(m,t) - d_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ b_{2,1}s_1(x,t) & -s_2(m,t) - d_2 & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \dots & \vdots \\ b_{N-1,1}s_1(m,t) & & & -s_{N-1}(m,t) - d_{N-1} & 0 \\ b_{N,1}s_1(m,t) & b_{N,2}s_2(m,t) & \dots & b_{N,N-1}s_{N-1}(m,t) & -s_N(m,t) - d_N \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}(m,t)} \mathbf{m}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} w_{in,1}(t) \\ w_{in,2}(t) \\ \vdots \\ w_{in,N-1}(t) \\ w_{in,N}(t) \end{bmatrix}}_{\mathbf{w}_{in}(t)}$$

Eq. 1

$$\mathbf{w}_{out}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_N \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \mathbf{m}(t)$$

Eq. 2

sendo s_i a função seleção, b_{ij} a função distribuição de quebra, $M(t)$ o *hold up* (massa de material contida no interior do moinho); p_i , p_{in} e p_{out} as distribuições granulométricas do *hold up*, da alimentação e da descarga, respectivamente.

Para a modelagem matemática do classificador é utilizada a curva de partição, a qual descreve a proporção de partículas que reportam ao produto grosso em função de seu tamanho. Essa curva é descrita utilizando a diagonalização da função proposta por Bill Whiten,⁽⁵⁾ a qual é capaz de descrever o efeito “anzol” da curva de partição, fenômeno esse frequentemente observado na classificação pneumática:

$$\mathbf{E}_u = \text{diag} \left(C_b \left[\frac{(1+\beta\beta^*q)(e^\alpha-1)}{e^{(\alpha\beta^*q)+e^\alpha-2}} \right] \right), \quad \mathbf{q} = \frac{dp}{d_{50c}}$$

sendo, \mathbf{E}_u a matriz diagonal da curva de partição, que representa a fração que reporta ao *undersize*. C_b é a proporção da alimentação que é submetida à ação de classificação; α é o parâmetro que define a inclinação da curva de partição, o qual caracteriza a acuidade da separação; β é o parâmetro que permite descrever o efeito anzol; β^* é o parâmetro que preserva a definição de $E_u = \frac{1}{2}C_b$, quando $dp_i = d_{50c}$; \mathbf{dp} é o vetor que contém o tamanho médio das partículas na alimentação do classificador; d_{50c} é o tamanho das partículas que são divididas igualmente entre os produtos *oversize* e *undersize*.

O classificador pode ser entendido como uma transformação linear do vetor de entrada \mathbf{w}_{AC} , ou seja, $\mathbf{w}_u = \mathbf{E}_u \mathbf{w}_{AC}$ e $\mathbf{w}_o = \mathbf{E}_o \mathbf{w}_{AC}$, sendo \mathbf{E}_o a matriz diagonal da curva de partição (fração que reporta ao *oversize*), $\mathbf{w}_{ac} = W_{AC} \mathbf{p}_{AC}$ como a taxa de alimentação discretizada, \mathbf{w}_u e \mathbf{w}_o as taxas de descarga discretizadas do produto grosso (*oversize*) e do fino (*undersize*), respectivamente. Os parâmetros α , β , d_{50c} e C_b foram relacionados com as principais variáveis operacionais do equipamento de classificação, sendo os resultados apresentados em outras publicações.^(6,7)

3 MODELAGEM DO CIRCUITO FECHADO DE MOAGEM (CFM)

No CFM, o material grosso, rejeitado pelo classificador, é reintroduzido no moinho para que sofra novas ações de quebra, de maneira que essa configuração introduz uma realimentação positiva no sistema (Figura 1).

Na configuração ilustrada na Figura 1, o fluxo w_{AC} é igual ao fluxo de saída do moinho. Assim, o fluxo de material rejeitado pelo classificador (*oversize*) pode ser descrito como: $w_o(t) = E_o Cx(t)$. O fluxo do *oversize* é direcionado a um transportador de sólidos que devolve o material à entrada do moinho. Esse transporte é geralmente realizado por meio de equipamentos que operam com características de fluxo empistonado, como é o caso de transportadores de correia e tubulações. Dessa maneira, o seu desempenho pode ser descrito quantitativamente como apenas um atraso de tempo, o qual é descrito pela expressão, $w_{cc}(t) = E_o Cx(t - \tau_T)$ em que τ_T é o atraso de tempo e $x(t)$ é o estado do sistema ($m(t)$). O fluxo do *undersize* w_u do classificador será considerado o fluxo de produto final do circuito e, deste modo, será representado pela variável $y(t)$ de saída do modelo. Portanto, $W_{in}p_{in} = W_f p_f + E_o Cx(t - \tau_T)$ e $y(t) = E_u Cx(t)$, logo:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x, t)x(t) + E_o Cx(t - \tau_T) + W_f(t)p_f \\ y(t) = E_u Cx(t) \end{cases}$$

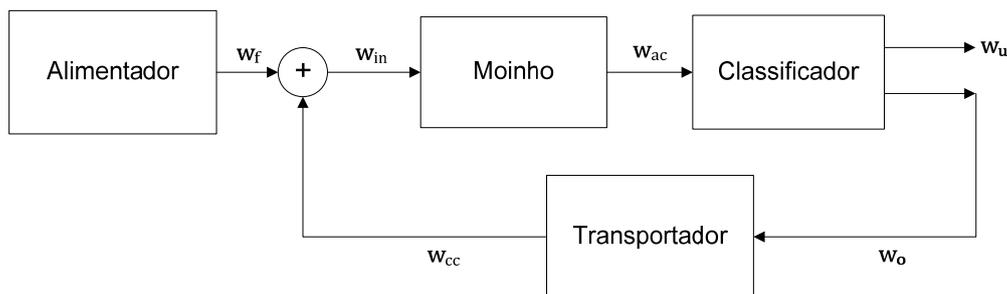


Figura 1. Diagrama de blocos do circuito fechado de moagem (configuração direta). w_f é o vetor das vazões mássicas no fluxo de alimentação do circuito; w_{cc} o vetor das vazões mássicas na carga circulante.

3.1 Variáveis Controladas do CFM

A instrumentação do processo é a etapa que precede a aplicação de controle realimentado, de maneira que o monitoramento automático das principais variáveis de processo é essencial para que o seu controle se torne viável. Analisando as equações do CFM e comparando com a instrumentação normalmente disponível em circuitos de moagem, vê-se que as variáveis do modelo normalmente passíveis de medição são $y(t)$ (a taxa e a distribuição granulométrica do produto), $\sum x(t)$ (o *hold up* do moinho), o vetor p_f (distribuição granulométrica da alimentação) e a medida de W_{cc} , (vazão da carga circulante). Nos processos nos quais a distribuição granulométrica do produto $y(t)$ não pode ser medida com a frequência adequada para alimentar os sistemas de controle, utiliza-se a medida da percentagem passante em um determinado tamanho de partícula. Neste trabalho as variáveis controladas do CFM serão a proporção passante em 45 μ m (P45) do produto e o *hold up* do moinho.

3.2 Variáveis Manipuladas do CFM

Nos circuitos de moagem a seco as variáveis manipuladas se restringem, geralmente, a apenas a taxa de alimentação W_f no moinho e à velocidade do rotor, V_r . Desta forma, essas serão as variáveis manipuladas no presente trabalho. Em princípio, outras variáveis como a fração da velocidade crítica de rotação do moinho, φ_c , o grau de enchimento, J , e o número de palhetas do classificador, N_p , também poderiam ser manipuladas. Entretanto, mudanças no valor dessas variáveis tendem a ser muito onerosas para o processo. No caso da usina piloto utilizada como base do presente trabalho,⁽⁶⁾ a alteração tanto em J quanto N_p demandava a parada e a desmontagem parcial dos equipamentos. Portanto, os valores dessas variáveis foram ajustados por meio da otimização *off-line* do tipo *Plant-Wide Optimization* antes do início da operação do circuito, tendo sido objeto de outro trabalho dos autores.⁽⁶⁾

3.3 Objetivos do Controle para o Processamento Mineral

A estratégia de controle no contexto do processamento mineral deve não só visar à estabilização do processo, mas também otimizar os objetivos econômicos da usina como um todo.⁽⁷⁾ Craig e McLeod⁽⁸⁾ propuseram resolver esta tarefa com a definição de uma série de sub-objetivos que são compatíveis com o objetivo global de otimizar o desempenho econômico da usina. Os sub-objetivos relacionados com o desempenho do circuito de moagem são então (modificado de Craig e McLeod⁽⁸⁾):

1. Melhorar a qualidade do produto;
 - a. atingindo a granulometria desejada;
 - b. diminuindo flutuações de tamanho;
2. Maximizar a produção;
3. Minimizar o consumo de aço e revestimentos por tonelada de produto;
4. Minimizar a energia consumida por tonelada de produto;
5. Maximizar a vida útil dos equipamentos.

É sabido que há um compromisso entre o tamanho das partículas do produto de um circuito de moagem e a taxa de produção (objetivos 1.a e 2). Isso se deve ao fato que, quando há um aumento na taxa de alimentação a fim de aumentar a produção, ocorre o engrossamento na distribuição de tamanho de partículas do produto. Atingir a granulometria desejada ao produto é fundamental para os processos de concentração mineral a jusante. Em geral, a recuperação de mineral de interesse será maior à medida que o produto apresenta uma granulometria mais fina (objetivo 1.a). No caso do cimento, o aumento da qualidade do produto se dá com o aumento da área superficial específica do material, que propicia um aumento na velocidade de hidratação e, assim, confere maior resistência ao concreto.

Para os objetivos 3 e 5, o sistema de controle deve possuir restrições quanto às variáveis manipuladas e controladas do processo a fim de operar o circuito em condições de operação que minimizem o desgaste dos equipamentos por tonelada de produto processado. Desta maneira, o tempo médio entre paradas da usina para manutenção pode ser estendido, reduzindo assim os custos operacionais.

Como o moinho de bolas é um equipamento que consome grande quantidade de energia e tem baixa eficiência, qualquer aumento de eficiência pode resultar em uma diminuição significativa dos custos operacionais da usina. Portanto, para que a eficiência energética máxima seja atingida é necessário operar o circuito com a taxa

máxima de transferência de sólidos do interior do moinho (objetivos 2 e 4). Assim, a razão entre energia consumida/produção deve ser a mais baixa possível.

4 DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE CONTROLE

O sistema de controle desenvolvido neste trabalho utilizará o modelo do processo como peça-chave para o cálculo das ações ótimas de controle. Esse modelo foi validado experimentalmente por Kallemback,⁽⁹⁾ tendo se mostrado capaz de descrever os principais efeitos da moagem e classificação no circuito.

4.1 Controle Preditivo Não Linear (NMPC)

O controlador desenvolvido neste trabalho utiliza a metodologia MPC (*Model Predictive Control*), porém empregando um modelo fenomenológico do processo, o qual se mostrou não linear.⁽⁹⁾ A estratégia proposta por Radhakrishnan,⁽¹⁰⁾ de controlar a granulometria do produto e permitir o *hold up* variar livremente em uma faixa, se mostra a mais promissora para alcançar os objetivos propostos e, portanto é utilizada no presente trabalho.

Segundo Meadows e Rawlings,⁽¹¹⁾ um controlador NMPC exibirá *offsets* nos casos de erros de modelagem e perturbações não medidas. Porém, esses problemas são comuns em aplicações práticas de controle. O controlador NMPC desenvolvido utiliza a metodologia do Estimador de Horizonte Móvel (MHE), descrito pela primeira vez em Jang, Joseph e Mukai,⁽¹²⁾ para a eliminação de *offsets* nas variáveis controladas. Na literatura existem diversos métodos de estimação de estados, com destaque para o Filtro de Kalman. Porém, conforme Rao, Rawlings e Mayne,⁽¹³⁾ para sistemas não lineares lentos o método do Estimador de Horizonte Móvel possui desempenho superior ao Filtro de Kalman Estendido.

O cálculo das ações futuras de controle é resolvido utilizando dois passos: o primeiro calcula o ponto ótimo de operação em estado estacionário e o segundo calcula a trajetória ótima para levar as saídas do sistema até o estado estacionário.

4.1.1 Controle preditivo do estado terminal

O controle preditivo do estado terminal desenvolvido neste trabalho visa determinar o ponto ótimo de operação da planta em estado estacionário. Logo, a dinâmica transiente é desconsiderada, de forma que o vetor de controle é reduzido para apenas a próxima entrada em $t+T$ e observa-se somente a saída do sistema no instante $t+k$ (fim do horizonte de controle). A forma da função objetivo escolhida é semelhante à de Radhakrishnan⁽¹⁰⁾, sendo dada por $E(x(k)) = W_u(k) \cdot P45(k)$. O problema de otimização passa a ser, então, a maximização dessa função sujeita a restrições de estabilidade da usina, à qualidade do produto e às limitações nos valores de entrada, ou seja, o estado futuro do sistema, ou também chamado terminal, deverá ser estável, o passante em 45 μ m deverá ser igual ao valor desejado e a taxa de produção deverá ser a maior possível, obedecendo às limitações dos equipamentos.

4.1.2 Controle preditivo da dinâmica transiente

O controle preditivo da dinâmica transiente desenvolvido neste trabalho tem o objetivo de levar a usina da melhor maneira possível até o objetivo final, determinado pelo controle do estado terminal. Sua formulação é semelhante àquela

básica do MPC descrita em Allgower et al.,⁽¹⁴⁾ porém considerando apenas o transiente. Logo,

$$\phi(x(k), u^h) = G(u(k)) + \sum_{i=0}^{h-1} L(x^u(x(k))(i), u^h(i))$$

sendo as funções $G(\cdot)$ e $L(\cdot)$ representadas da seguinte forma:

$$G(u(k, k+h)) = \lambda_1 \|\Delta u\|^2$$

$$L(x(k)) = \lambda_2 \|P45(x(k)) - P45^{traj}\|^2 + \lambda_3 \|overshoot\|^2 + \lambda_4 P(x(h))$$

nas quais, λ são fatores de ponderação maiores que zero, $P45^{traj}$ a trajetória de P45 desejada e $P(\cdot)$ uma função penalidade, dada por:

$$P(M(h)) = \begin{cases} (M(h) - M_{max}(h))^2, & M(h) > M_{max}(h) \\ 0, & M_{max}(h) \geq M(h) \geq M_{min}(h) \\ (M(h) - M_{min}(h))^2, & M(h) < M_{min}(h) \end{cases}$$

na qual $M_{max}(h)$ e $M_{min}(h)$ são os valores máximos e mínimos admitidos para o *hold up* no horizonte h , respectivamente. Portanto, o problema de otimização pode ser escrito como $P_h(x(k))$: $\phi_h^{opt}(x(k)) = \min_{\mathbf{u}^h} \{\phi_h(x(k), \mathbf{u}^h) \mid \mathbf{u}^h \in \mathbb{R}^{n_u}\}$ sujeito às restrições de variação máxima das variáveis manipuladas, limitação das ações de controle e overshoot máximo de P45.

Portanto, o controlador NMPC pode ser entendido como uma camada superior de controle de processo, a qual faz uso de otimização e opera em escala de tempo mais longa que o controle descentralizado (regulatório). Na usina piloto estudada neste trabalho, os controladores PID descentralizados são os que controlam a taxa de alimentação nova, a velocidade de rotação do moinho de bolas e a velocidade de rotação do classificador pneumático. Os valores dos ganhos λ e horizontes de previsão k e h foram ajustados manualmente, obtendo-se o conjunto: $\lambda_1=2$; $\lambda_2=5$; $\lambda_3=0,5$; $\lambda_4=0,1$; $k=50$ e $h=3$. A Figura 2 representa esquematicamente o diagrama da estratégia de controle desenvolvida.

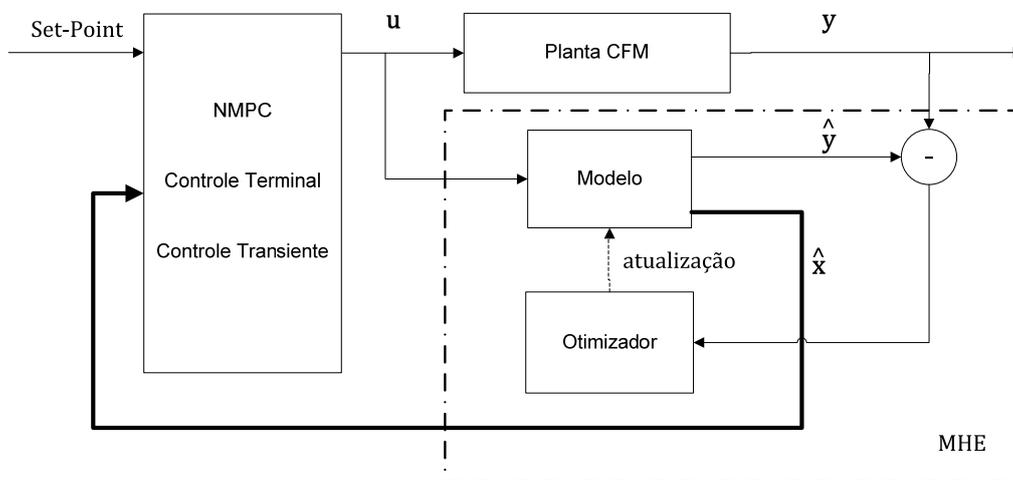


Figura 2. Diagrama do controle NMPC desenvolvido.

4.2 Controle PID

O controle PID foi implementado considerando o processo um sistema MIMO, de duas entradas (W_f e V_r) e duas saídas (P45 e *hold up*) (Figura 3). Utilizando dados de simulação, o sistema foi linearizado em torno do ponto ótimo de operação definido em 5.1. As funções de transferência, na escala de tempo de minutos, encontradas são apresentadas na figura.

Para a definição do melhor pareamento das malhas de controle, utilizou-se o critério RGA (*Relative Gain Array*). Nesse critério são avaliados apenas os ganhos estáticos do sistema, ou ganhos DC, ignorando-se os efeitos transientes. A matriz RGA encontrada é dada por:

$$\Lambda = \begin{matrix} & W_f & V_r \\ \begin{matrix} P45 \\ Holdup \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,595 & 0,405 \\ 0,405 & 0,595 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

O método RGA indica que o melhor pareamento para esse sistema é utilizar a taxa de alimentação (W_f) para controlar o passante na peneira de 45 μm e a velocidade do rotor do classificador (V_r) para controlar o *hold up*. Entretanto, o RGA mostra o forte acoplamento do sistema.

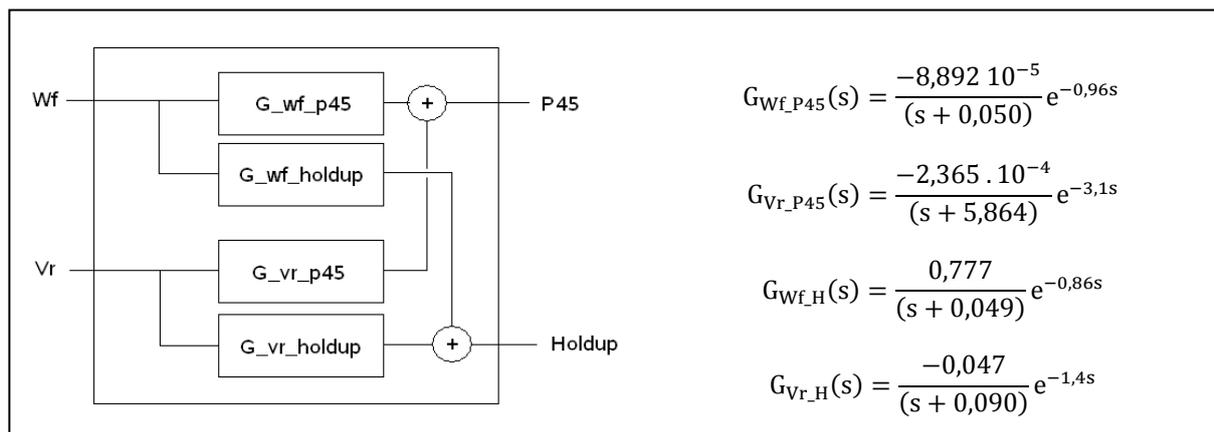


Figura 3. Diagrama e funções de transferência do CFM linearizado.

Como descrito em Radhakrishnan ⁽¹⁰⁾, não é necessário um controle rigoroso do *hold up*, sendo possível tolerar que ele oscile entre as restrições de máximo e mínimo. Sendo assim, será utilizado somente um controle do tipo P (proporcional) para a malha V_r - *hold up*, o qual utilizará como *set-point* o valor médio das restrições de máximo e mínimo. Como P45, é o indicador principal da qualidade do produto torna-se então, necessário a anulação de *offsets* nesta variável, logo um controle PI foi implementado nessa malha.

Primeiramente, para a sintonia dos controladores foi utilizada a técnica de Ziegler-Nichols. Porém, esse ajuste não apresentou bons resultados, devido ao alto ganho que o ajuste proporciona e as discontinuidades inerentes do processo (saturação e *slew rate*). Em seguida, os controladores foram reajustados manualmente até suas respostas se tornarem aceitáveis. Nas vizinhanças do ponto de linearização o controlador proporcionou um *settling time* de 60 minutos com 1% de *overshoot* em P45.

5 RESULTADOS

5.1 Definição das Condições Operacionais por Meio de Otimização

Antes do início da operação do processo foi necessário definir os ajustes das variáveis que não poderiam ser alteradas durante a operação contínua do circuito. Para o circuito considerado no presente trabalho elas foram o grau de enchimento (J), a distribuição de tamanhos dos corpos moedores (d_{cm}), a velocidade de rotação do moinho (φ_c) e o número de palhetas do classificador pneumático (N_p). Essa definição foi fundamental para a eficiência operacional da usina, devendo ser encontrada com o auxílio de métodos de otimização. Kallemback, Bhaya e Tavares,⁽⁶⁾ descrevem o desenvolvimento de um programa, que baseado em um modelo matemático do sistema, permitindo identificar essas condições ótimas, tendo como objetivo a maximização da taxa de alimentação de sólidos visando um produto em que 80% é passante na peneira de 45 μm (Tabela 1).

Como o modelo não contempla a previsão de desgaste dos corpos moedores e a energia consumida no processo, não foi surpresa observar que a otimização levasse o valor de J ao máximo possível. Essa condição resultou no *hold up* de 2729 g ($U = 60\%$) e na carga circulante de 131%.

Tabela 1. Parâmetros ótimos de operação do CFM⁽⁶⁾

Variável	Valor ótimo	Restrições	
		Máximo	Mínimo
Grau de enchimento J	35,0%	35,0%	25,0%
Fração da velocidade crítica φ_c	79,4%	85,0%	65,0%
Diâmetro do corpos moedores	16 mm	-	-
Número de palhetas N_p	30	36	6
Taxa de alimentação nova W_f	202,1 g/min	1000 g/min	50 g/min
Velocidade do rotor do classificador V_r	2035,5 RPM	4500 RPM	500 RPM

5.2 Comparação dos Controladores

Nesta seção são comparados o controle P-PI clássico e o NMPC. São utilizados como critérios de desempenho os índices ITAE (*integral time absolute error*), IAE (*integral absolute error*), e ISE (*integral squared error*),⁽²⁾ assim como a integral da taxa de produção passante na peneira 45 μm , Prod45 e a taxa de produção máxima contínua, ProdMax.

São simulados três cenários: o primeiro visa avaliar a resposta dos controladores para o controle da qualidade do produto em face a perturbações leves e comuns no processo de moagem (Tabela 2). O segundo simula a ocorrência do evento acidental de quebra de parte das palhetas do classificador pneumático. O terceiro apresenta casos de variações significativas de *set-point* de P45, levando o sistema a operar distante do ponto de linearização.

A Figura 4 mostra as resposta dos controladores para o primeiro cenário de teste. Percebe-se que o controlador NMPC apresentou as respostas mais rápidas em P45 e manteve o nível mais alto de produção. O controlador clássico também apresentou bom desempenho, mostrando a qualidade do controle PID na rejeição de perturbações. As diferenças nos índices de Prod45 e ProdMax foram insignificantes. Os índices de desempenho da Tabela 3 demonstram que o controlador NMPC foi o mais efetivo.

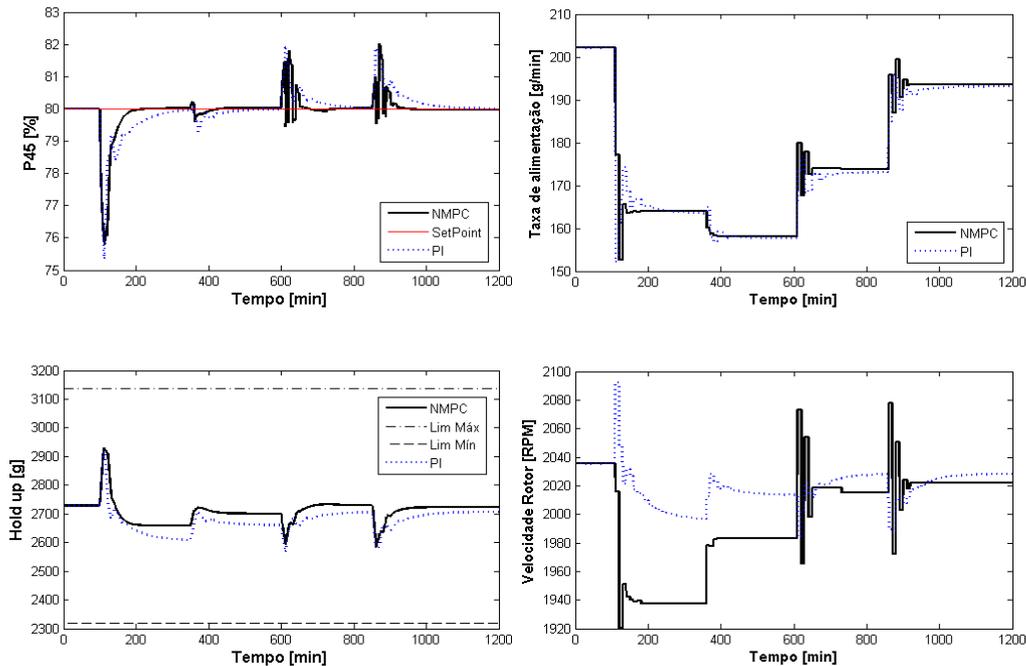


Figura 4. Variáveis controladas e manipuladas para o cenário de testes 1.

Tabela 2. Cenário de testes número 1

Instante (min)	Set-point P45 (%)	Set-point Hold up (g)	Perturbação
0	80,00	2729 ± 15%	-
100	80,00	2729 ± 15%	-20% moabilidade
350	80,00	2729 ± 15%	10% granulometria
600	80,00	2729 ± 15%	5% vazamento na carga circulante
850	80,00	2729 ± 15%	20 g/min vazamento na alimentação

Tabela 3. Índices de desempenho dos controladores para os cenários simulados

Índice	Cenário 1		Cenário 3	
	NMPC	PI	NMPC	PI
ITAE	871	1.698	26.010	113.990
IAE	2,240	3,701	20,24	74,41
ISE	0,042	0,049	4,25	11,75
Prod45	157,84	157,49	391,85	268,27
ProdMax	193,60	193,01	529,30	368,40

O segundo caso difere do primeiro no tempo igual a 100 min, quando é simulada a quebra de 2 das 30 palhetas do classificador. A Figura 5 mostra que essa perturbação é completamente anulada pelo controlador NMPC, enquanto que o PI instabilizou. Isso mostra que, mesmo para o problema regulador, o controle PI pode não ser capaz de lidar com os distúrbios inerentes ao processo mineral.

O terceiro estudo de caso visa levar o sistema a condições bastante diferentes das inicialmente planejadas e, assim, avaliar a resposta dos controladores em outros *set-points* de P45. A Tabela 4 mostra o conjunto de *set-points* e perturbações para este cenário de testes.

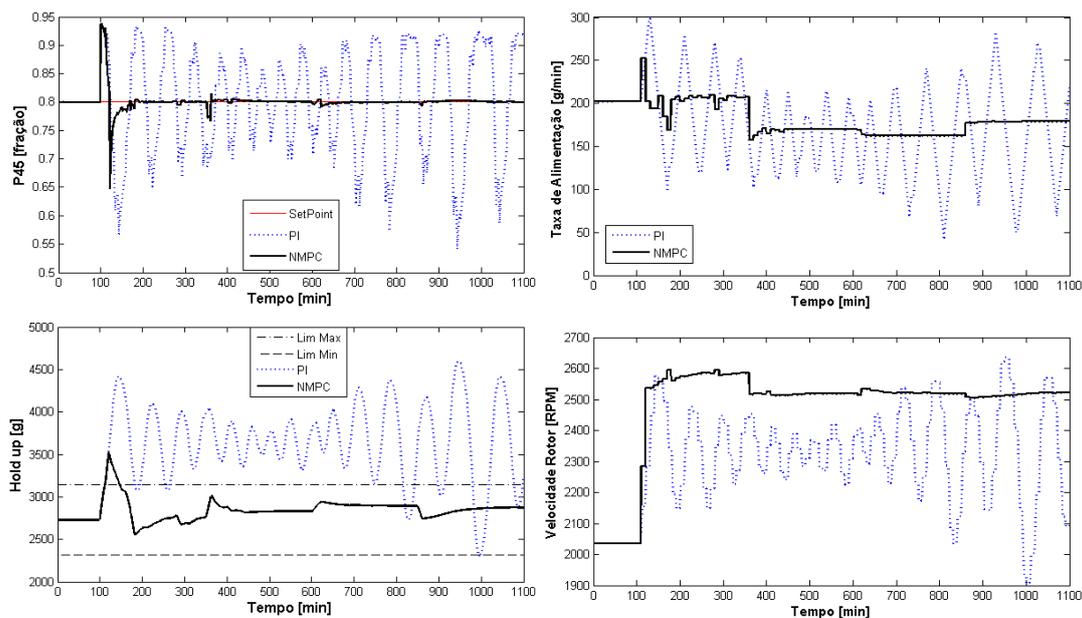


Figura 5. Variáveis controladas e manipuladas para o cenário de testes 2

Tabela 4. Cenário de testes número 3

Instante (min)	Set-point P45 (%)	Set-point Hold up (g)	Perturbação
0	80,0	$2729 \pm 15\%$	-
100	70,0	$2729 \pm 15\%$	-
400	60,0	$2729 \pm 15\%$	-
700	50,0	$2729 \pm 15\%$	-
1000	50,0	$2729 \pm 15\%$	20% moabilidade
1300	50,0	$2729 \pm 15\%$	-10% granulometria
1600	90,0	$2729 \pm 15\%$	-

A Figura 6 apresenta a resposta dos controladores para o terceiro cenário de testes. Ela mostra que o controlador NMPC manteve o comportamento de *settling time* desejado durante todo o teste, resultado não alcançado pelo controlador PI, o qual teve comportamento distinto em cada ponto de operação. O controlador NMPC também foi o mais rápido na rejeição de perturbações e proporcionou os níveis mais altos de produção. O controlador PI atingiu a taxa de produção mais baixa, não obedecendo aos limites de *hold up* e chegando a instabilizar a usina no *set-point* de P45 igual a 90%.

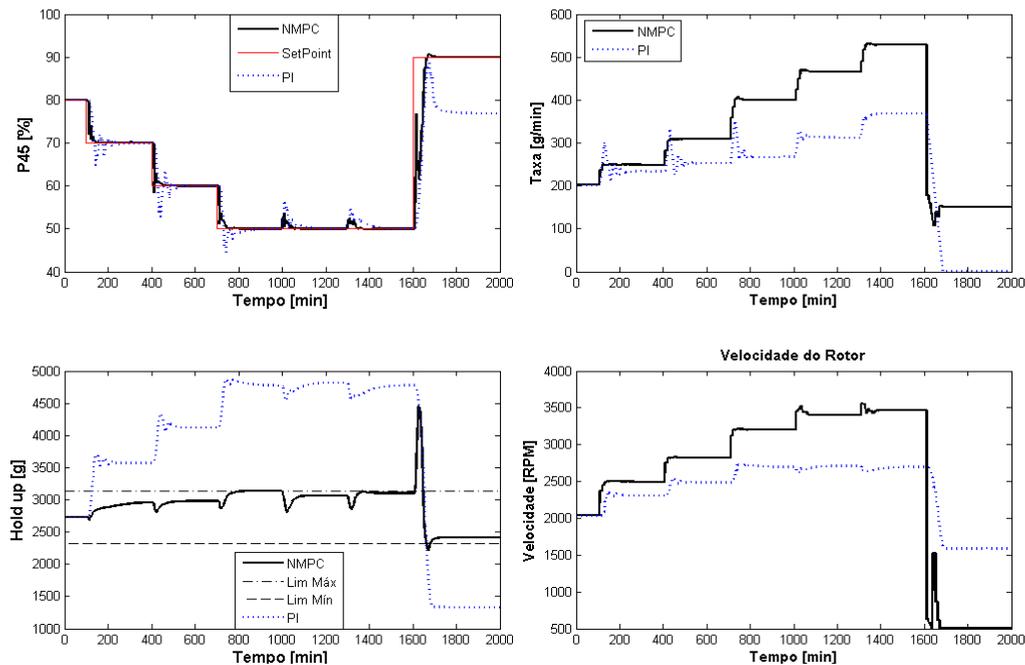


Figura 6. Variáveis controladas e manipuladas para o cenário de testes 3

O otimizador convergiu em todos os instantes, exceto durante o transiente de 50% para 90% de P45, fazendo com que o controlador NMPC excedesse os limites de *hold up* durante aquele momento. Porém, esse controlador foi o único capaz de manter o *hold up* dentro da faixa da desejada durante os estados estacionários. Os índices de desempenho da Tabela 2 mostram que o controle NMPC foi o de melhor desempenho, com a taxa de produção mais alta e os menores níveis de erros.

6 CONCLUSÕES

A partir de um modelo ajustado para um circuito piloto que consistiu de um moinho e classificador a seco, foram inicialmente ajustadas as variáveis que não puderam ser manipuladas dentro do sistema de controle, a fim de identificar a condição ótima de operação. Esse ponto ótimo de operação para a condição de 80% passante em 45 μm foi a condição escolhida para a linearização do sistema e implementação da estratégia de controle linear.

Comparou-se, então, o desempenho de um controlador PID clássico e do algoritmo NMPC proposto. O controle preditivo se mostrou o melhor em todos os cenários testados, apresentando-se como uma boa opção para indústrias, principalmente as cimenteiras. Esse controlador se mostrou capaz de aumentar a produção do circuito simulado, podendo ser utilizado em tempo real.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 CHEN, X., ZHAI, J., LI, S., LI, Q. Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. *Minerals Eng.*, v. 20, p. 1099–1108. 2007.
- 2 CAMACHO, E. F., BORDONS, C. *Model Predictive Control*. 2a edição, 2003.

- 3 AUSTIN, L.G., KLIMPEL, R.R., LUCKIE, P.T., *Process Engineering of Size Reduction*, SME, 1984.
- 4 BENZER, H., Ergun, L., LYNCH, A.J., ONER, M., GUNLU, A., CELIK, I.B., AYDOGAN, N., Modeling Cement Grinding Circuits, *Minerals Eng.*, v. 14, p. 1469-1482, 2001.
- 5 NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T., *Mineral Processing Circuits: Their Operation and Optimization*, JKMRRC Monograph Series, JKMRRC, 1996.
- 6 KALLEMBACK, G.M., BHAYA, A., TAVARES, L.M.M. Pre-control optimization of a pilot grinding circuit. *13th ABM Iron Ore Symposium*, 2012.
- 7 HULBERT, D.G. The state of the art in the control of milling circuits. *6th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*. 1989.
- 8 CRAIG, I. K., MACLEOD, I. M. Specification framework for robust control of a run of-mine ore milling circuit. *Control Eng. Practice*, v. 3, p. 621–630. 1995.
- 9 KALLEMBACK, G. M. *Otimização e Controle Preditivo Não Linear de circuito de moagem a seco*. Dissertação de Mestrado. PEMM/COPPE/UFRJ. 2012.
- 10 RADHAKRISHNAN, V.R. Model based supervisory control of a ball mill grinding circuit. *J. Process Control*, v. 9, p. 195-211, 1999.
- 11 MEADOWS, E.S., RAWLINGS, J.B. Receding horizon control with an infinite cost. *Anais, American Control Conference – ACC*, San Francisco, California, USA, 2926– 2930, 1993.
- 12 JANG, S.S, JOSEPH, B., MUKAI, H. Comparison of two approaches to on-line parameter and state estimation of nonlinear systems. *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, v. 25, p. 809–814, 1986.
- 13 RAO, C.V., RAWLINGS, J.B., MAYNE, D.Q. Constrained state estimation for nonlinear discrete-time systems: Stability and moving horizon approximations. *IEEE Trans. Automat. Contr.* v. 48, p. 246–258, 2003.
- 14 ALLGOWER, F.T.A., BADGWELL, A., QIN, J.S., RAWLINGS, J.B., WRIGHT, S.J. Nonlinear predictive control and moving horizon estimation – An introductory overview. *Advances in Control Highlights of ECC'99*, p. 391–449. Springer, 1999.