

CONTROLE PREDITIVO APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO TÍPICO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA PARA APROVEITAMENTO DE MINÉRIOS

JÚLIA MARIA DE CARVALHO VALE*, MÁRCIO FALCÃO SANTOS BARROSO*, GIOVANI GUIMARÃES RODRIGUES†, TALES FONTE BOA*, EDUARDO BENTO PEREIRA*, VALCERES VIEIRA ROCHA SILVA*

*Praça Frei Orlando, 170
Universidade Federal de São João del-Rei
São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil

†Av. Amazonas, 7675
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Emails: juliamcvale@gmail.com, barroso@ufsj.edu.br, giovani@des.cefetmg.br,
fonteboa93@hotmail.com, ebento@ufsj.edu.br, vvrsilva@ufsj.edu.br

Abstract— The ore processing allows a significative recovery and maximizes the investment return on a plant of this nature. As the flotation process is multivariate, this work presents a predictive controller to optimize production when applied in a typical flotation column. This methodology includes the restrictions on process operation in the optimization step. The predictive control implemented is capable of maintaining desired performance characteristics while minimizing the control effort.

Keywords— Mining, Flotation Column, Predictive Control, Multivariable, Restrictions, Optimization.

Resumo— O beneficiamento de minério é determinante na recuperação máxima do mineral-minério e portanto no retorno do investimento que pode ser alcançado em uma planta desta natureza. Uma vez que o processo de flotação em coluna é multivariável, neste trabalho, é apresentado um controle preditivo multivariável para automação e otimização de uma coluna piloto de flotação. Este controle mantém a estabilidade do processo e admite a inclusão de restrições ao funcionamento do processo. O controle preditivo implementado é capaz de manter as características de desempenho desejadas enquanto que minimizando o esforço do controle.

Palavras-chave— Mineração, Coluna de Flotação, Controle Preditivo, Multivariável, Otimização.

1 INTRODUÇÃO

Sendo um dos processos mais utilizado na indústria mineral, a flotação possibilita de forma econômica e com rendimentos satisfatórios o aproveitamento de minérios complexos e/ou de baixo teor. A coluna de flotação é um dos equipamentos de destaque neste processo. As melhorias substanciais na qualidade dos concentrados obtidos nas colunas em diversas unidades industriais, operando com diferentes tipos de minérios, somadas aos ganhos no desempenho metalúrgico e à economia nos custos de capital e operação, demonstram a importância desse equipamento para a indústria mineral (Oliveira & Aquino, 2005).

No controle de uma coluna de flotação, o objetivo principal é a obtenção de melhores índices de recuperação e de teor no concentrado. Devido às dificuldades existentes nas medições *online* destas variáveis, opta-se comumente por controlá-las indiretamente através das variáveis nível da camada de espuma, *bias* e *holdup* do ar na zona de coleta (Lima, 2008). As variáveis manipuladas são normalmente as vazões de água de lavagem, ar e não flotado.

O sistema de controle no processo de flotação em coluna deve atuar de forma direta sobre as variáveis manipuladas, sendo capaz de man-

ter, adequadamente, as variáveis controladas em seus valores de referência, mesmo perante perturbações de carga ou quaisquer outros distúrbios (Lima, 2008).

O controle automático da coluna de flotação pode ser realizado através de diversas técnicas, como: algoritmos Proporcional Integral Derivativo (PID's) (Villar et al., 1999), lógica difusa (Carvalho et al., 1999), controle preditivo (Calisaya et al., 2012; Riquelme et al., 2016), controle supervisão difuso (Bergh et al., 1998), e também mediante a um controle multivariável robusto H_∞ (Persechini, 2001) e H_2 (Lima, 2008).

Uma vez que o processo de flotação em coluna é multivariável e possui restrições para seu funcionamento, este trabalho investiga a implementação de um controlador preditivo multivariável para a operação de uma coluna piloto.

Neste trabalho, pretende-se testar o controle preditivo em uma planta piloto de uma coluna de flotação, não sendo objetivo analisar qual a melhor estratégia de controle para este sistema.

2 A COLUNA DE FLOTAÇÃO

2.1 Composição da coluna de flotação

O esquema clássico de uma coluna de flotação está apresentado na Figura 1 com ênfase nos

aspectos importantes para o processo. Ela consiste de duas zonas principais: a zona de coleta (ou recuperação) e a zona de limpeza (ou de espuma). Primeiramente, a seção de recuperação é situada entre a entrada de ar e a interface polpa-espuma. Sua função é recuperar o mineral a ser flotado, através de um contato eficiente entre as partículas minerais e as bolhas de ar ascendentes. Logo, essa zona tem como objetivo promover o contato e a adesão partícula-bolha. Já a seção de limpeza é compreendida entre a interface polpa-espuma e o transbordo do material flotado. Nesta seção, mantém-se constante a altura da camada de espuma, que é lavada através de um fluxo de água em contracorrente, eliminando as partículas hidrofílicas arrastadas (Oliveira & Aquino, 2005).

A alimentação de polpa previamente condicionada com reagentes é feita na seção de recuperação ou coleta. As partículas minerais interagem com as bolhas do ar ascendente, introduzido na base da coluna, resultando no processo de coleta das partículas hidrofóbicas. A agregação formada pela partícula-bolha é então transportada até a seção de limpeza, onde é contactada em contracorrente com a água de lavagem introduzida no topo da coluna (Oliveira & Aquino, 2005). A finalidade da água de lavagem é proporcionar a estabilidade e limpeza da espuma, eliminando as partículas contaminantes carregadas por arraste mecânico. As partículas minerais hidrofóbicas coletadas constituem a fração flotada, sendo separadas das partículas hidrofílicas, que saem pela coluna e constituem a fração não flotada.

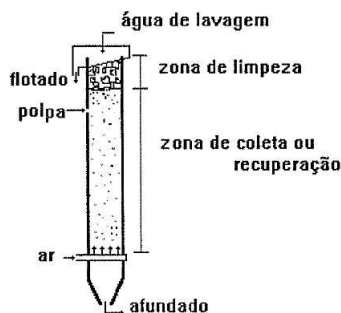


Figura 1: Esquema básico da coluna de flotação.
Fonte: (Persechini, 2001)

2.2 Controle na coluna de flotação

A meta principal de um controle em uma coluna de flotação é manter a operação desta em condições estáveis. Isso pode ser alcançado controlando o nível da interface polpa-espuma. Os fluxos de ar, água e polpa são também controlados de forma a melhorar o desempenho metalúrgico das colunas.

Para alcançar o objetivo principal são utilizadas as duas estruturas de controle. A primeira consiste no controle do nível da interface através da

regulagem da taxa de fluxo da fração não flotada da coluna, mantendo a vazão de água de lavagem constante. A segunda estrutura consiste do controle do nível atuando sobre a vazão de água de lavagem enquanto a vazão de rejeito é regulada para manter constante a relação entre os fluxos volumétricos de rejeito e da alimentação (Oliveira & Aquino, 2005).

Na atualidade, têm sido desenvolvidas estratégias de medição direta do teor do mineral de interesse no concentrado, e atuação nas vazões de ar e de água de lavagem e nível da interface para controlar o desempenho metalúrgico da coluna em uma faixa de operação pré-estabelecida. Essa opção permite o desenvolvimento de sistemas especialistas para controle das colunas de flotação.

2.3 Modelo da coluna de flotação

Os dados utilizados neste trabalho são de uma coluna piloto montada no Centro de Tecnologia Nuclear (CDTN) localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais. As variáveis do processo trabalhadas nesta planta são:

- Variáveis manipuladas:
 - Vazão de água de lavagem (U_W): posiciona a válvula de admissão de água de lavagem;
 - Vazão do afundado (não flotado) (U_T): manipula os sinais enviados para a velocidade da bomba de retirada do não-flotado;
 - Vazão de alimentação de ar (U_g): posiciona a válvula de admissão de ar.
- Variáveis controladas:
 - Altura da camada de espuma (H);
 - *Bias*: fluxo resultante de água descendente através da camada de espuma (não utilizada neste trabalho);
 - *Holdup* do ar na zona de coleta (ϵ_g): percentagem volumétrica de ar em uma determinada região da coluna.

A Figura 2 esquematiza a instrumentação desta planta. Na coluna, um medidor de vazão do tipo eletromagnético (FT-03) é usado para medir a água de lavagem. O controle dessa vazão é realizado por uma válvula pneumática (XC-01). A vazão de ar é medida por um medidor de vazão de massa (FT-04) e seu controle realizado também por uma válvula pneumática (XC-02). A vazão do não flotado é controlada por meio de uma bomba peristáltica, SC-02 (controlada por um inversor de frequência) (Persechini, 2001). Dois medidores de pressão (PT-01 e PT-02) são utilizados, possibilitando os cálculos da altura da camada de espuma e

do *holdup* do ar na zona de recuperação. Esses medidores estão localizados, respectivamente, a 230 cm e a 350 cm do topo da coluna (Lima, 2008).

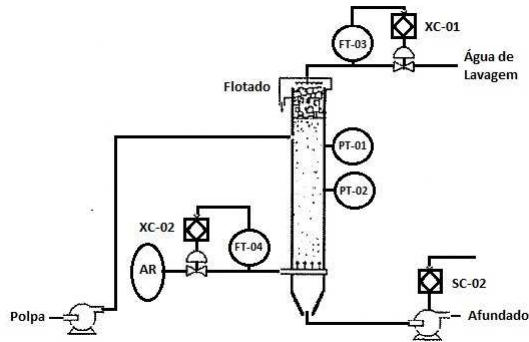


Figura 2: Planta da coluna piloto montada no CDTN.

Fonte: (Persechini, 2001)

O modelo matemático para esta coluna piloto em sistema bifásico água e ar encontra-se desenvolvido em Persechini (Persechini, 2001).

$$\begin{bmatrix} h(s) \\ \epsilon_g(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_W(s) \\ U_g(s) \\ U_T(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

O modelo identificado em termos das funções de transferência em tempo contínuo na matriz de transferência da Equação 1 está representado pela Equação 2.

$$\begin{aligned} G_{11} &= \frac{-0.034e^{-10s}}{s} \\ G_{12} &= \frac{-0.015}{s} + \frac{4.414e^{-60s}(-681.88s+1)}{(80.68s+1)(486.46s+1)} \\ G_{13} &= \frac{0.016}{s} \\ G_{21} &= \frac{0.18e^{-20s}}{94.91s+1} \\ G_{22} &= \frac{0.37e^{-60s}}{48.26s+1} \\ G_{23} &= \frac{0.07e^{-20s}}{(38.11s+1)} \end{aligned} \quad (2)$$

O controlador preditivo é projetado para controlar automaticamente a altura da camada de espuma e o *holdup* do ar na zona de coleta. O controle automático do *bias* não será implementado, devido à falta de instrumentação.

3 CONTROLE PREDITIVO

A estratégia de controle preditivo *Model Predictive Control* (MPC) é, atualmente, uma das mais utilizadas em aplicações industriais. Talvez a principal razão para esse êxito seja que essa técnica pode lidar com diversas situações, como: ser aplicada para controlar plantas monovariáveis (SISO) e multivariáveis (MIMO), incorporar um modelo dinâmico do processo, que permite considerar o efeito futuro das variáveis manipuladas sob as controladas e podem ser incluídas restrições

de entrada e saída na formulação da lei de controle (Bravo & Normey-Rico, 2009; Júnior, 2015).

Ao contrário do que ocorre nos controladores PID, no MPC não existe a necessidade do emparelhamento entre as variáveis controladas e as variáveis manipuladas, isto é, não é preciso definir qual MV controlará uma CV específica. Dessa maneira, o MPC dispensa esta etapa no projeto do sistema de controle o que facilita a sua implementação e anula a possibilidade de um emparelhamento ruim (Júnior, 2015).

O controle MPC refere-se a um conjunto de métodos que fazem uso explícito do modelo do processo para a obtenção do sinal de controle a partir da minimização de uma função de custo (Favaro, 2012). A partir do modelo do processo, obtêm-se as saídas futuras para um horizonte de predição N_p . Essas saídas previstas são calculadas a cada instante t , utilizando os valores passados das entradas, saídas e sinais de controle.

Em contra partida, os sinais de controle futuros são determinados pelo critério de otimização, a fim de minimizar a diferença entre a resposta predita do processo e a resposta desejada.

Para a elaboração do controle preditivo, não foram considerados os atrasos. O modelo foi manipulado utilizando o bloco *S-function level 2* do *MatLab*®, aplicado à planta piloto modelada em espaço de estados, escrito na forma incremental.

4 SINTONIA DO CONTROLE PREDITIVO PARA A COLUNA DE FLOTAÇÃO

Para a elaboração do sistema de controle deve-se, inicialmente, definir as variáveis controladas (H e ϵ_g), e as variáveis manipuladas (U_w , U_g e U_T). A próxima etapa é a sintonia dos parâmetros: horizonte de controle (N_c), horizonte de predição (N_p) e tempo de amostragem.

Os horizontes de controle e predição escolhidos, após testes no controle, foram $N_p = 40$ e $N_c = 30$, respectivamente. A partir de testes, foi observado que o sistema converge rápido, não necessitando de valores altos para estes horizontes. Valores maiores que os escolhidos aumentou o tempo computacional. Valores menores não foram adequados para o rastreamento do controlador.

O tempo de amostragem deve ser escolhido de modo a se ter uma representação parcimoniosa da resposta a um degrau da planta. Logo, o tempo trabalhado foi de 5 segundos de acordo com Persechini (Persechini, 2001). O modelo a tempo discreto foi obtido empregando o método de discretização ZOH (Segurador de ordem zero), considerando que o controle permanece constante entre os instantes de amostragem.

O algoritmo MPC utilizou uma função de custo quadrática sujeita às restrições lineares representadas na Tabela 1. São restrições reais nas

variáveis manipuladas e controladas para o modelo matemático trabalhado.

Tabela 1: Restrições de canalização.

Variável	Valor Mínimo	Valor Máximo
$U_w / U_g / U_t$	0	100%
h	20cm	140cm
ϵ_g	0	100%

O peso do controle também é uma condição importante. Deve-se utilizar apenas um valor constante, e não uma função em s , para evitar que a ordem do controlador cresça desnecessariamente (Persechini, 2001). Deve-se também possibilitar a implementação prática do controlador, evitando constantes de tempo rápidas que não sejam compatíveis com o intervalo de amostragem. Foi assumido peso de controle igual a 1 para cada variável de entrada. Verificou-se, após testes, que pesos diferentes não apresentaram variações significativas nos resultados.

5 RESULTADOS

O primeiro teste foi realizado aumentando o valor desejado da altura da camada de espuma de 80 para 90 cm no instante igual a 1000 segundos. O *setpoint* do *holdup* do ar na zona de coleta manteve-se constante em 15% ao longo do experimento.

A Figura 3 representa o resultado de simulação obtido para a altura de camada de espuma. Se a camada de espuma for menor que a necessária, a recuperação do flotado aumenta e o teor diminui. Por outro lado, se ela for maior que a necessária, a recuperação do flotado diminui e o teor aumenta.

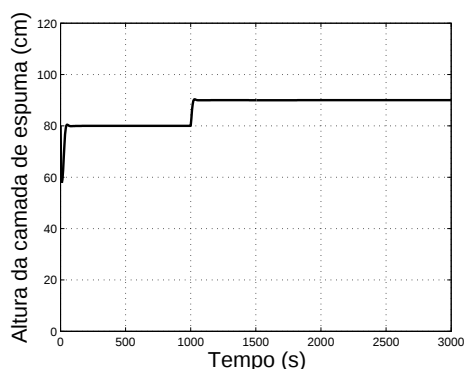


Figura 3: Comportamento da altura da camada de espuma para mudança de *setpoint*.

A Figura 4 mostra o comportamento do *holdup* do ar devido a esta mudança. Ocorreu interferência nessa variável de controle quando houve a mudança no *setpoint*, permanecendo dentro da faixa de 1% do seu valor em estado estacionário. Devido à posição dos medidores de pressão, que

estão localizados na parte superior da coluna, a medida do *holdup* do ar na zona de coleta é sensível às variações da altura da camada de espuma, já que esta medida é realizada na seção entre os dois medidores de pressão. Essa interferência comprova a importância da interação entre as variáveis controladas, justificando o uso de um controlador multivariável (Persechini, 2001).

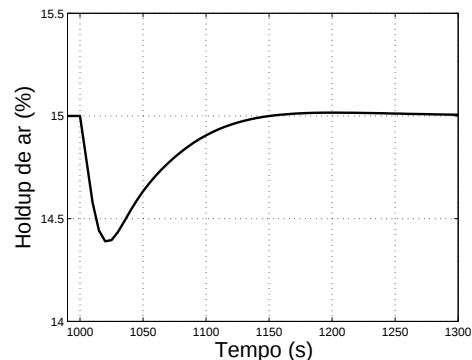


Figura 4: Comportamento *holdup* do ar para mudança de *setpoint* na altura da camada de espuma.

A Figura 5 representa o comportamento das variáveis de entradas. As vazões obedeceram às restrições impostas ao processo, ou seja, os sinais de controle ficaram entre 0 a 100%.

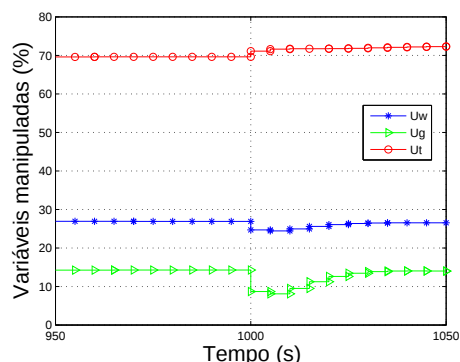


Figura 5: Comportamento das variáveis de entrada para mudança de *setpoint* na altura da camada de espuma.

O segundo teste refere-se a mudança no valor no sinal de referência no *holdup* do ar na zona de coleta de 15% para 18%. A variação ocorreu no instante 2000 segundos. O *setpoint* da altura da camada de espuma manteve-se constante em 80 cm ao longo do experimento.

A Figura 6 traz o comportamento da altura da camada de espuma para esta mudança. Observa-se que o valor manteve a 0,2% do seu *setpoint*.

A Figura 7 apresenta o comportamento do *holdup* do ar para mudança no seu *setpoint*. O tempo de acomodação para a mudança de *setpoint* foi de 150 segundos.

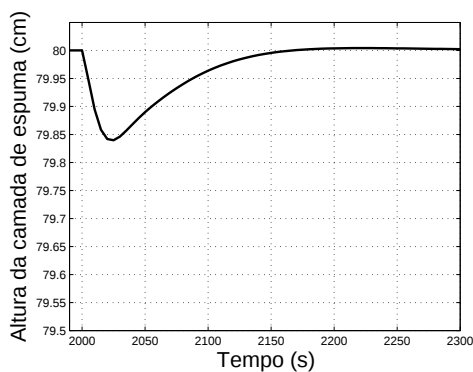


Figura 6: Comportamento da altura da camada de espuma para mudança de *setpoint* no *holdup* do ar.

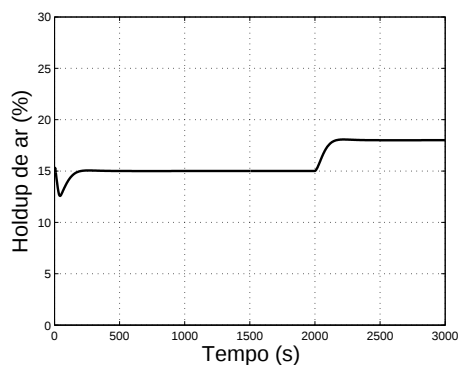


Figura 7: Comportamento do *holdup* do ar para mudança de *setpoint*.

A Figura 8 mostra o comportamento das variáveis de entrada quando ocorreu a mudança do valor de referência do *holdup* do ar.

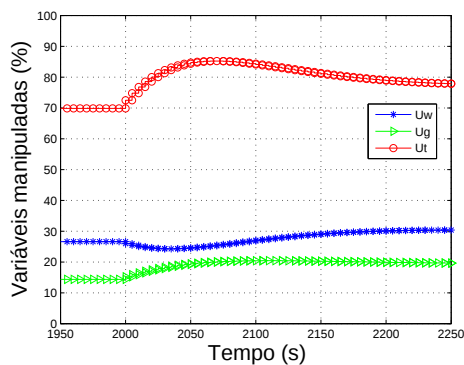


Figura 8: Comportamento das variáveis de entrada para mudança de *setpoint* no *holdup* do ar.

As Figuras 9 e 10 apresentam os comportamentos da altura da camada de espuma e do *holdup* do ar na zona de coleta, respectivamente, quando acrescido 20% no valor da vazão de não flotado. Ambas as variáveis controladas mantiveram seus valores de referência. O rastreamento foi possível, pois o aumento da vazão de não flo-

tado ocasionou diminuição da vazão de água de lavagem e aumento da vazão de ar (Figura 11).

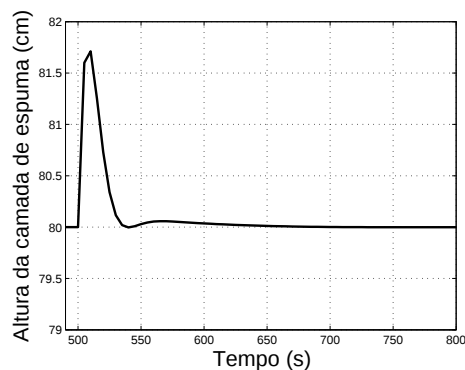


Figura 9: Comportamento da altura da camada de espuma para variação de 20% na vazão de não flotado.

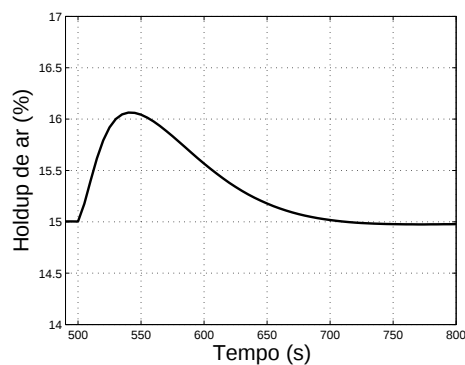


Figura 10: Comportamento do *holdup* do ar para variação de 20% na vazão de não flotado.

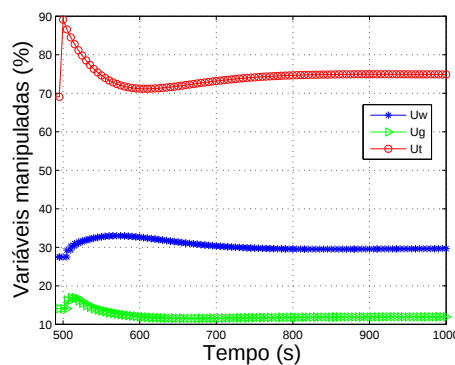


Figura 11: Comportamento das variáveis manipuladas para variação de 20% na vazão de não flotado.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma proposta de controle multivariável avançado para uma coluna de flotação. O objetivo do controle é obter um determinado nível de desempenho para o processo

de flotação, o qual é especificado pela recuperação metalúrgica para o processo de flotação e pelo teor do concentrado final.

O controlador preditivo foi projetado para controlar a altura da camada de espuma e o *holdup* de ar na zona de coleta de uma coluna de flotação por meio da manipulação de sinais de controle U_W , U_T e U_g .

Os experimentos realizados atendem aos requisitos básicos de controle. O controlador preditivo implementado foi capaz de manter em zero o erro entre a variável controlada e o *setpoint* mesmo quando ocorreram alterações nos valores de referência da altura da camada de espuma e *holdup* de ar, e com a inserção de ruídos nas entradas do processo.

Foi feito um paralelo dos resultados encontrados neste trabalho com Lima (Lima, 2008). A coluna piloto estudada foi a mesma em ambos os casos. Em Lima (Lima, 2008) foi acrescentada a variável controlada *bias* e utilizado o controle robusto H_2 . Os testes simulados demonstraram que as variáveis controladas acompanharam as variações nos seus *setpoints*, contudo observou-se um tempo de acomodação superior ao obtido aqui.

Quando o valor de referência do *holdup* de ar na zona de coleta foi alterado de 15% para 20%, foram necessários, aproximadamente, 117 minutos para entrar em regime permanente, tempo superior ao encontrado neste trabalho quando foi alterado de 15% para 18% (150 segundos = 2,5 minutos).

O tempo de acomodação para a altura da camada de espuma foi de 45 minutos utilizando o controlador robusto H_2 , quando o valor de referência dessa variável foi alterada de 80 para 85 cm. No controlador preditivo, foi necessário menos de 1 minuto na mudança de *setpoint* de 80 para 90 cm.

Por análise gráfica das variáveis manipuladas, Lima (Lima, 2008) verificou a saturação dos atuadores em alguns momentos, o que pode justificar o elevado tempo de acomodação. Neste trabalho, isso não foi observado devido às restrições reais impostas e respeitadas.

Logo, o controlador preditivo apresentou resultados superiores ao controlador robusto H_2 nos pontos avaliados nesta comparação, utilizando a mesma planta piloto.

Mediante análise das respostas do sistema com o controlador preditivo em malha fechada, é possível considerar que a metodologia aplicada ao projeto é adequada ao processo de flotação em coluna.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à agência de fomento CAPES - Brasil pelo apoio financeiro.

Referências

- Bravo, C. O. A. e Normey-Rico, J. E. (2009). Controle de plantas não lineares utilizando controle preditivo linear baseado em modelos locais. *Controle e Automação*, Outubro, Novembro e Dezembro, 20(4):465–481.
- Bergh, L. G., Yianatos, J. B. e Leiva, C. A. (1998). Fuzzy supervisory control of flotation columns. *International Journal of Mineral Processing*, 11(8):739–748.
- Calisaya D., Poulin E., Desbiens A., del Villar R., Riquelme A. . (2012). Multivariable predictive control of a pilot flotation column. *Anais de 2012 do IEEE American Control Conference (ACC)*, 4022– 4027.
- Carvalho, T., Durão, F. e Fernandes, C. (1999). Dynamic characterization of column flotation process laboratory case study. *International Journal of Mineral Processing*, 12(11):1339–1346.
- Favaro, J. (2012). *Controle preditivo aplicado à planta piloto de neutralização de ph*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Controle) - Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.
- Júnior, Gesner Andrade. (2015). *Sintonia ótima de controladores MPC considerando incertezas de modelagem*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA, Brasil.
- Lima, L. B. (2008). *Controle ótimo H_2 para coluna de flotação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, Brasil.
- Oliveira, M. L. M. e Aquino, J. A. (2005). Aspectos relevantes das colunas de flotação. *XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia (ENTMME)*, 243–250, Natal, RN, Brasil.
- Persechini, M. A. M. (2001). *Estratégias de controle para o processo de flotação em coluna*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Belo Horizonte. Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Riquelme A., Desbiens A., Villar R., Maldonado M. (2016). Predictive control of the bubble size distribution in a two-phase pilot flotation column. *Minerals Engineering*, 89(1):71–76.
- Villar, R., Grégoire, M. e Pomerleau, A. (1999). Automatic control of a laboratory flotation column. *International Journal of Mineral Processing*, 12(3):291–308.