

Calibração e validação de modelo dinâmico de circuito de flotação industrial

Mário V. P. Guimarães ^{*,**} Livia Marques Faustino ^{***}
Guilherme Vianna Raffo ^{****} Thomas V. B. Pinto ^{***}
Thiago A. M. Euzébio ^{***}

^{*} Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale.

^{**} Vale S.A, Rio Piracicaba, MG, (e-mail: mario.guimarães@vale.com).

^{***} Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, MG (e-mail: {livia.faustino, thomas.pinto, thiago.euzebio}@itv.org)

^{****} Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG (e-mail: raffo@ufmg.br)

Abstract: : This work presents the calibration and validation of a dynamic simulator of a complete industrial flotation circuit. The simulator, implemented in the software IDEAS, reproduces the stages rougher, cleaner, recleaner, and scavenger of the iron ore flotation circuit of the Conceição plant II, Vale S.A. The process dynamic behaviour is based on phenomenological models and empirical considerations. Real mass balance and mineral concentration data were used during the calibration and validation of the simulator. The results indicate the simulated circuit performed very close to the real one, with average relative error of the concentration content of the product of each stage of 0.86%.

Resumo:

Este trabalho apresenta a calibração e validação de um simulador dinâmico de um circuito completo de flotação industrial. O simulador, implementado no *software* IDEAS, reproduz os estágios *rougher*, *cleaner*, *recleaner* e *scavenger* do circuito de flotação de minério de ferro da usina de Conceição II, Vale S.A. O comportamento dinâmico do processo é descrito através de modelos fenomenológicos e considerações empíricas. Dados reais de balanço de massa e concentração mineral foram usados durante a calibração e validação do simulador. Os resultados indicam desempenho do circuito simulado muito próximo ao real, com erro relativo médio do teor de concentração do produto de cada estágio de 0,86%.

Keywords: Flotation; Dynamic simulation; Calibration; Validation; Iron ore.

Palavras-chaves: Flotação; Simulação dinâmica; Calibração; Validação; Minério de ferro.

1. INTRODUÇÃO

O processo de flotação é um dos principais processos de separação sólido-líquido da indústria mineral. O destaque da flotação é devido à capacidade de concentrar partículas de baixo teor e fina granulometria, que é uma necessidade crescente na indústria à medida que minérios de baixo teor e finamente disseminados são explorados, características que impedem o beneficiamento mineral por demais processos (Wills and Finch, 2015).

A concentração por flotação ocorre com base em uma propriedade físico-química diferenciadora das partículas minerais; a molhabilidade, caracterizando-as em hidrofílicas e hidrofóbicas. Minerais hidrofóbicos não têm afinidade por água e, portanto, não interagem com suas moléculas e sim com as bolhas de ar que ascendem nas células de flotação. Devido à diferença da hidrofobicidade e hidrofilicidade entre as partículas que compõem o minério é possível separá-las em dois fluxos: o que contém as partículas valiosas à

indústria, chamado de concentrado; e o que contém os minerais de ganga, as partículas sem valor econômico, chamado de rejeito.

O processo de flotação ocorre no interior de tanques, usualmente células ou colunas de flotação. O tanque é alimentado continuamente por uma polpa, composta por água e partículas sólidas de minério condicionadas por reagentes modificadores, responsáveis por conferir hidroflicidade ou hidrofobicidade às superfícies dos minerais de minério e de ganga. No interior do tanque, um mecanismo de aeração injeta bolhas de ar que, com densidade mais baixa do que a da polpa, flutuam até a superfície. Ao longo de sua trajetória, as bolhas de ar colidem com as partículas sólidas de minério imersas na polpa. As partículas hidrofílicas rejeitam a combinação com as bolhas de ar e se depositam no fundo do tanque, de onde são removidas junto com a água. As partículas hidrofóbicas se aderem às bolhas formando um agregado partícula-bolha. Os inúmeros agregados partículas-bolhas, ao atingirem

a superfície, se aglutinam e formam uma espuma. Essa espuma transborda em uma calha e é levada ao próximo processo de beneficiamento.

O processo de flotação pode ser operado de maneira direta ou reversa. A diferença entre esses dois modos de operação está relacionada ao local da célula de flotação de onde é retirado o concentrado. Na flotação direta, o concentrado é retirado junto à espuma. Este tipo de processo é adequado para separação de minérios nos quais as partículas valiosas são hidrofóbicas. Na flotação reversa, o concentrado é retirado pela parte inferior do tanque, junto com a água. Nesse caso, as partículas minerais valiosas são essencialmente hidrofílicas. O minério de ferro, um dos minérios mais abundantes no mundo, é separado, principalmente, por meio de flotação reversa (Ma et al., 2011).

Dada a complexidade do processo de flotação, a construção de um modelo digital dinâmico deste processo é uma tarefa desafiadora. De acordo com Boschert and Rosen (2016), um modelo digital é uma representação fiel de um processo físico real, que contém todas as informações, aspectos físicos e funcionais desse processo. Estes modelos podem ser utilizados em diversas aplicações como treinamento de operadores, análise do processo e desenvolvimento de sistemas de controle.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador dinâmico do circuito de flotação reversa da usina de beneficiamento de minério de ferro de Conceição II, Vale S.A. A calibração e validação deste simulador, feitas com dados reais, da usina buscam comprovar a fidelidade do processo simulado ao real. Dessa forma, o simulador pode ser usado como um ambiente simulado para o desenvolvimento de sistemas de controle.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Casali et al. (2002) desenvolveram um simulador dinâmico somente de um circuito *rougher* do processo de flotação com base em modelos dinâmicos não lineares derivados de relações fenomenológicas e empíricas. Com o intuito de usá-lo no desenvolvimento de sistemas de controle e treinamento de operadores, os autores utilizaram dados de uma planta real para calibrar o modelo. Uma série de testes simulados, baseados em variações de taxa e concentração de material na alimentação do circuito, comprovaram qualitativamente e quantitativamente a capacidade do simulador de ser usado para as aplicações desejadas. Yianatos et al. (2012) também desenvolveram um simulador dinâmico de um banco de células *rougher*. Os dados usados para calibração e validação do simulador são dados reais de granulometria, taxa de polpa, concentração de minerais e nível da polpa de uma planta de mineração da Codelco, no Chile.

Seppälä et al. (2016) desenvolveram um simulador dinâmico do circuito de flotação de uma planta piloto. Os autores ampliaram o trabalho apresentado por Seppälä et al. (2014), em que um simulador estático desta mesma planta piloto foi desenvolvido. O desempenho do simulador dinâmico da flotação foi validado estatisticamente, apresentando um $R^2 = 0,78$, $RMSE = 1,16\%$ e erro

relativo igual a 12,7%, desempenho considerado válido pelos autores.

Um simulador dinâmico de um circuito real de flotação de cobre foi desenvolvido por Roine et al. (2011) especificamente para treinamento de operadores de uma usina de mineração. Os autores abordam os modelos usados para a representação das dinâmicas do processo como arraste de partículas, recuperação mássica e taxa de produto. No entanto, o enfoque do trabalho é a integração do simulador com um sistema de treinamento de operadores.

Estes trabalhos apresentam diferentes abordagens de modelos e variáveis utilizadas para calibração e validação dos simuladores dinâmicos de um circuito de flotação. Além também de mostrarem a aplicabilidade destes simuladores. No entanto, nenhum deles apresenta um simulador dinâmico de um circuito completo de flotação industrial, integrando os estágios *rougher*, *cleaner*, *re-cleaner* e *scavenger*.

3. CIRCUITO DE FLOTAÇÃO

A usina de Conceição II, localizada em Itabira-MG, produz 12 Mt de minério de ferro (Fe) por ano. O minério beneficiado pela usina usualmente é lavrado da mina com uma concentração de 40% de minério de ferro e tem como principal contaminante o quartzo (SiO_2), compondo cerca de 40% do ROM (*Run Of Mine*). O beneficiamento do minério acontece por meio dos estágios de cominuição, composto por britagem e moagem; deslamagem; flotação; e filtragem.

O circuito de flotação de Conceição II é formado por três linhas de produção, cada uma contendo 11 células de flotação, sendo 2 *roughers*, 2 *cleaners*, 1 *re-cleaner* e 6 *scavengers*, como mostra a Figura 1. As etapas *rougher*, *cleaner* e *re-cleaner* beneficiam o concentrado das células ao longo do circuito visando aumentar a recuperação mineral ao final do processo. O concentrado da *re-cleaner* é o concentrado final do circuito, com um teor de quartzo abaixo de 1,5%. As etapas *scavenger* são responsáveis por recuperar partículas de hematita que possam ter sido levadas junto ao rejeito das demais etapas. O concentrado do primeiro banco de *scavengers*, junto ao rejeito da *re-cleaner* e o concentrado final da etapa *scavenger*, que são fluxos com alto teor de ferro, são recirculados no circuito para alimentar a etapa *rougher*. Já o rejeito final da etapa *scavenger* é o rejeito final do processo de flotação.

O *software* IDEAS (*Integrated Design Engineering with Advanced Simulation*), desenvolvido pela Andritz Automation, foi utilizado no desenvolvimento do circuito simulado. Ele utiliza objetos parametrizáveis para representar equipamentos, sensores e atuadores. Os modelos das operações unitárias são baseados em aspectos fenomenológicos e empíricos (Júnior et al., 2019). Na literatura, nenhum trabalho envolvendo o *software* IDEAS e a simulação de um circuito de flotação foi encontrado. Porém, há diversos trabalhos que comprovam a eficiência deste *software* na criação de simuladores dinâmicos de processos de beneficiamento mineral (Reis et al., 2018; Magalhães and Euzébio, 2019; Albuquerque et al., 2019; Duarte et al., 2020).

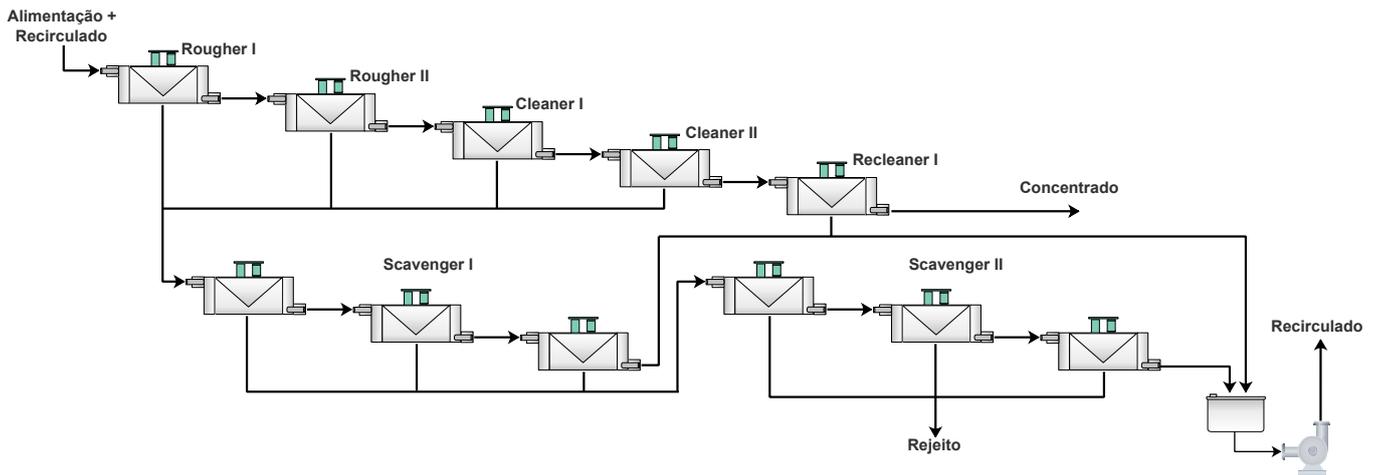


Figura 1. Linha de produção do circuito de flotação da usina de Conceição II.

4. MODELO

Todas as etapas do circuito de flotação de Conceição II foram modeladas utilizando informações reais da planta. Aspectos físicos das células de flotação, essenciais para o cálculo do tempo de residência do material, também foram inseridos no modelo. Todas as células são cilíndricas, com 7,81 m de diâmetro e 5,32 m de altura, com exceção das células *cleaners*, com 4,56 m de altura. Os valores de percentual de ar na espuma foi considerado de 30% para todas as células.

4.1 Tempo de residência

Em um processo contínuo, a célula recebe e verte material continuamente. O tempo que o material permanece dentro da célula de flotação, chamado de tempo de residência (t_{res}), é determinado pelo volume da célula e sua vazão de entrada, como

$$t_{res} = \frac{V_{Cel}}{Q_{alim}}, \quad (1)$$

em que V_{Cel} é o volume útil da célula e Q_{alim} é a vazão volumétrica de material alimentado.

4.2 Recuperação mineral na espuma

O modelo que descreve a recuperação (R_t) de cada mineral na espuma, proposto por Garcia Zuñiga (1935), é dado por

$$R_t = R_\alpha(1 - e^{-kt}), \quad (2)$$

em que R_α é o percentual máximo de recuperação do mineral e k é a constante cinética ($1/min$) de flotação do minério.

Quanto maior o valor de k , mais rapidamente é atingida a recuperação máxima do mineral flotado, resultando em um menor tempo de residência. A recuperação instantânea na espuma se aproxima da recuperação máxima à medida que t tende a infinito, ou seja, quanto maior o tempo de residência do mineral na célula de flotação, maior será sua recuperação na espuma. Na prática, a recuperação de cada mineral flotado, se liberado, é limitada pelo seu tempo de residência.

4.3 Velocidade superficial de ar

A velocidade superficial de ar, J_g , é calculada como a vazão de ar injetado pela área da superfície da célula de flotação,

$$J_g = \frac{Q_{ar}}{A_{cel}}, \quad (3)$$

em que Q_{ar} é a vazão de ar injetado na célula e A_{cel} é a área da seção transversal da célula.

Quanto maior a velocidade superficial do ar, mais rápida é a ascensão das bolhas na polpa e com isso o processo de recuperação mineral na espuma é acelerado. Esta correção é realizada por

$$k^* = \frac{kJ_g}{J_{g0}}, \quad (4)$$

em que J_{g0} é a velocidade superficial do ar projetado para a célula.

4.4 Altura da espuma

Quanto mais alta a camada de espuma, maior a probabilidade de uma partícula se soltar das bolhas e voltar para a polpa. O efeito da altura da espuma na recuperação mássica do flotado é dado de acordo com

$$FR = 1 - FH/FH_{max}, \quad (5)$$

em que FR é a fração de massa recuperada na espuma, FH é a altura instantânea da espuma e FH_{max} é a altura máxima que a camada de espuma pode atingir.

4.5 Dosagem de reagentes

Reagentes são adicionados à polpa para intensificar as características hidrofílicas e hidrofóbicas dos minerais. Na flotação de minério de ferro, os principais reagentes utilizados são aminas e amido. Nem toda a concentração de reagente utilizada é absorvida pelas partículas minerais. Segundo Araujo et al. (2008), cerca de 50% da amina é perdida na água flotada.

A quantidade de amina dosada em cada célula reduz pela metade da quantidade dosada na célula anterior. Como parte da massa de minério também é flotada, a dosagem de

amina por célula é corrigida pela taxa mássica alimentada em cada célula, dada por

$$D_i = \frac{M_0}{M_i} (1 - e^{-\frac{t}{t_{res,i}}}) \sum \frac{D_{i,j}}{2}, \quad (6)$$

em que D_i é a dosagem de amina (g/t) na célula i , M_0 é a taxa mássica alimentada na flotação (t/h), M_i é a taxa mássica alimentada na célula i (t/h), $D_{i,j}$ é a dosagem (g/t) das células j que alimentam a célula i e $t_{res,i}$ é o tempo de residência da célula i .

A mudança de dosagem não afeta instantaneamente a flotabilidade das partículas dentro da célula de flotação. Por causa disso, foi adicionado um atraso de primeira ordem neste modelo, em que a constante de tempo é o tempo de residência da célula de flotação.

5. RESULTADOS

5.1 Calibração

A calibração foi realizada por estágios do circuito, de forma a simplificar o procedimento e garantir o desempenho adequado de cada estágio. A calibração se baseou no ajuste das constantes cinéticas do ferro e do quartzo em cada estágio da flotação, enquanto as variáveis do processo foram mantidas fixas, de forma que os teores de concentração simulados de cada mineral no concentrado e rejeito dos estágios estivessem próximos aos valores reais. A massa de material usada para alimentar cada estágio é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Massa total de alimentação de cada estágio.

| Estágio | Massa total (t/h) |
|---------------------|-------------------|
| <i>Rougher</i> | 1710,65 |
| <i>Cleaner</i> | 1436,72 |
| <i>Recleaner</i> | 1257,95 |
| <i>Scavenger I</i> | 1630,04 |
| <i>Scavenger II</i> | 1152,81 |

Em um estudo conduzido por Lima et al. (2013), os autores discutiram o efeito dos reagentes, amina e amido, na recuperação de minério de ferro e quartzo em Itabiritos. Neste estudo foi definido o valor de recuperação máxima destes minerais no concentrado, considerando uma dosagem fixa de amido em 500 g/t. Os autores realizaram testes com diferentes dosagens de amina e definiram os valores de recuperação máxima na espuma, mostrados na Tabela 2. Como o minério beneficiado em Conceição II é um tipo de Itabirito, estes valores foram utilizados para calcular, de forma linear, a recuperação máxima do minério de ferro e quartzo no circuito simulado, com base na dosagem de amina.

Tabela 2. Recuperação mássica máxima.

| Dosagem Amina (g/t) | R_{max} Fe (%) | R_{max} SiO ₂ (%) |
|---------------------|------------------|--------------------------------|
| 60,00 | 29,28 | 98,96 |
| 100,00 | 39,01 | 99,30 |

As constantes cinéticas, k , do minério de ferro e quartzo foram definidas empiricamente por meio de simulações. A Tabela 3 apresenta os valores da constante cinética dos minerais para cada estágio.

Estágio Rougher: A vazão de ar de ambas as células *rougher* foi mantida constante em 750 m³/h; os níveis máximos da espuma da primeira e segunda células foram ajustados para 50 cm e 40 cm, respectivamente; a dosagem de amina foi definida em 115 g/t, por ser o valor definido pelo controlador da planta, como apresentado por Costa et al. (2018).

A Figura 2 mostra o percentual da massa dos componentes sólidos da polpa de concentrado do estágio. O atraso de cerca 0,3 h na medição dos teores é devido ao tempo para enchimento das células, período em que não há fluxo de concentrado. Assim que a célula enche e entra em estabilidade de nível, a válvula de controle começa a liberar polpa de concentrado para o próximo estágio. O pico de concentração visto no teor de SiO₂ ocorre porque, com o intuito de controlar o nível, a vazão de descarga das células aumenta. Essa porção de polpa descarregada é composta por minerais que tiveram pouco tempo de residência na célula e, portanto, não tiveram tempo de serem selecionados pelo processo de flotação.

Os valores simulados de teor de concentração do minério de ferro e quartzo na polpa de concentrado do estágio *rougher*, e dos demais estágios, são apresentados na Tabela 4. Os valores reais da usina de Conceição II também são apresentados nesta tabela.

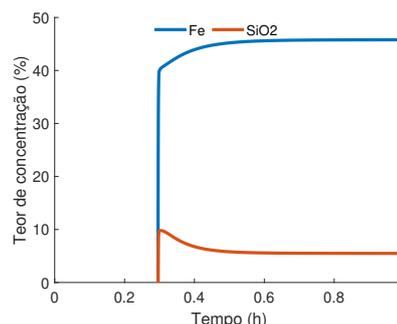


Figura 2. Teor de concentração do Fe e SiO₂ na polpa de concentrado da etapa *rougher*.

Estágios Cleaner e Recleaner: A vazão de ar aplicada às células de flotação dos estágios *cleaner* e *recleaner* foi de 750 m³/h, como no estágio *rougher*. O nível máximo de espuma foi ajustado de forma a corrigir a quantidade de material flotado. Para a primeira e segunda célula *cleaner*, os níveis máximos foram ajustados para 30 cm e 20 cm, respectivamente; e para a célula *recleaner*, 15 cm.

A Figura 3 exhibe os teores simulados dos minerais no concentrado destes estágios. O teor de minério de ferro no concentrado da *cleaner* é menor do que no estágio *recleaner*; analisando o quartzo, essa relação é inversa. Isto é esperado, já que o estágio *recleaner* realiza o último passo do processo de concentração, retirando quase 2/3 do quartzo restante no concentrado.

Scavenger: A altura máxima da espuma nas três células da etapa *scavenger I* são, 20, 15 e 5 cm, respectivamente. Para a *scavenger II*, o FH_{max} das células foi ajustado para 45, 20 e 10 cm, respectivamente. A vazão de ar injetada em ambas as etapas foi de 300 m³/h.

Tabela 3. Constante cinética dos minerais por estágio.

| Mineral | Constante cinética, $k(\text{min}^{-1})$ | | | | |
|------------------|--|----------------|------------------|--------------------|---------------------|
| | <i>Rougher</i> | <i>Cleaner</i> | <i>Recleaner</i> | <i>Scavenger I</i> | <i>Scavenger II</i> |
| Fe | 0,180 | 0,455 | 0,080 | 0,356 | 0,640 |
| SiO ₂ | 0,490 | 0,535 | 0,387 | 0,380 | 0,310 |

Tabela 4. Teores de Fe e SiO₂ simulados e reais por estágio e erro relativo.

| | <i>Rougher</i> | | <i>Cleaner</i> | | <i>Recleaner</i> | | <i>Scavenger I</i> | | <i>Scavenger II</i> | |
|----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | Ferro | SiO ₂ | Ferro | SiO ₂ | Ferro | SiO ₂ | Ferro | SiO ₂ | Ferro | SiO ₂ |
| Dados de usina | 45,88 | 5,56 | 47,92 | 1,43 | 48,84 | 0,61 | 31,16 | 6,84 | 29,75 | 11,25 |
| Simulado | 45,78 | 5,49 | 47,87 | 1,43 | 48,83 | 0,64 | 31,16 | 6,76 | 29,53 | 11,17 |
| Erro (%) | 0,22 | 1,27 | 0,10 | 0,00 | 0,02 | 4,92 | 0,00 | 1,18 | 0,74 | 0,72 |

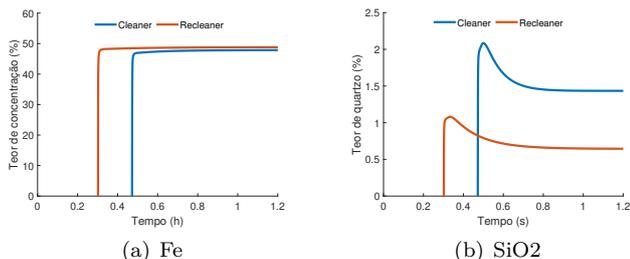


Figura 3. Teor de concentração do Fe e SiO₂ no concentrado das etapas *cleaner* e *recleaner*.

O concentrado de ambos os estágios são pobres em ferro dado que são etapas que tratam o rejeito dos demais estágios. O concentrado da *scavenger II*, que é alimentada com o rejeito da *scavenger I*, é o mais pobre, com apenas 12,82% de minério de ferro. Isto pode ser observado na Figura 4.

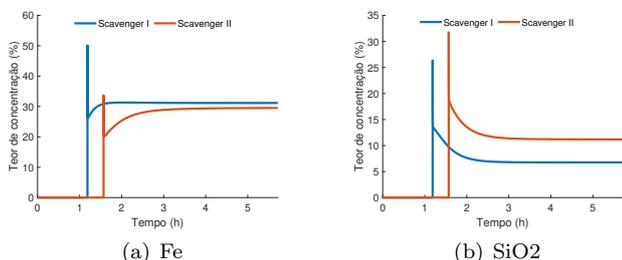


Figura 4. Teor de concentração do Fe e SiO₂ no concentrado das etapas *scavenger I* e *scavenger II*.

Análise estatística: De modo a verificar a aderência do desempenho do processo simulado ao real, o erro relativo dos teores de minério de ferro e quartzo simulados e reais foi calculado para cada estágio e apresentado na Tabela 4. A média dos valores de erro é 0,86%, sendo que todos valores estão abaixo de 1,3%, com exceção da teor de quartzo da *recleaner*. O alto valor de erro deste parâmetro é causado pela proporção baixa de massa de quartzo em relação à polpa do concentrado deste estágio. Uma pequena alteração na massa desse mineral causa uma variação significativa no teor.

5.2 Validação

Dois testes foram conduzidos para avaliar o desempenho do circuito simulado quanto ao beneficiamento do minério. As perturbações aplicadas são baseadas em situações reais

e comuns na planta: *i*) a qualidade da alimentação do circuito de flotação, representada pelo teor de quartzo, foi alterada de 37,66% para 22,71%; *ii*) a taxa de alimentação do circuito foi reduzida de 1710,65 t/h para 1650 t/h. Em nenhum dos testes houve alteração de outra variável.

Mudanças bruscas no teor de concentração dos minerais na alimentação da flotação implicam em significativas variações no teor de concentração do produto final. A Figura 5 mostra como a redução do teor de SiO₂ na alimentação da flotação causa um efeito quase instantâneo na qualidade do concentrado final. Como esperado, ao melhorar a qualidade na entrada de um processo de separação com taxa de recuperação constante, gera-se um produto com teores de contaminante mais baixos. O tempo para estabilização do teor de SiO₂ no novo patamar foi de aproximadamente 2,5h.

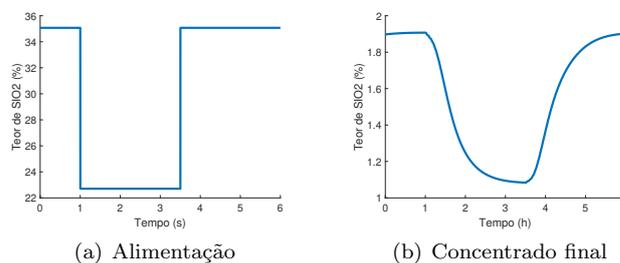


Figura 5. Teor de quartzo (SiO₂) na alimentação do circuito e no concentrado final (*recleaner*).

O segundo teste, apresentado na Figura 6, aponta uma redução do teor de SiO₂ no concentrado final da flotação, dada a queda da taxa de alimentação do circuito. Esta melhora na qualidade do produto é devida a um aumento no tempo de residência da polpa nas células de flotação, dado o menor volume de entrada (ver Equação (1)). Ademais, como o R_{max} é maior para o quartzo do que para o minério de ferro, mais quartzo é flotado para a espuma do que minério de ferro, consequentemente menor é o teor de contaminante no concentrado final.

6. CONCLUSÃO

O circuito de flotação completo da usina de Conceição II foi reproduzido em um simulador dinâmico. Valores de variáveis coletados da usina e parâmetros físicos dos equipamentos serviram de base para calibração do simulador, que apresentou um erro relativo médio no teor de concentração dos minerais de 0,86%. Testes de validação mostraram que o simulador calibrado reproduz qualitativamente

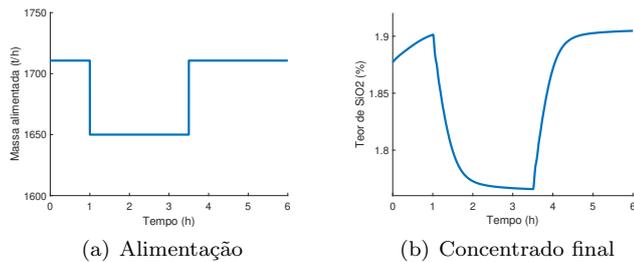


Figura 6. Taxa de alimentação do circuito e teor de quartzo no concentrado final (*re-cleaner*).

o comportamento da planta real. Futuros trabalhos irão acrescentar os efeitos da granulometria no desempenho do processo e realizar novos testes de validação. Concomitantemente, estratégias de controle serão desenvolvidas e validadas no simulador dinâmico.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; do conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ); do Instituto Tecnológico Vale (ITV); da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

REFERÊNCIAS

Albuquerque, K., Silva, H., Teodoro, E., Fonseca, A., Garioli, G., Lopes, Ê., Cota, L., and Euzébio, T. (2019). Averaging level control of bulk solid material using a tripper car. *IFAC-PapersOnLine*, 52(14), 147–152.

Araujo, D.M., Yoshida, M.I., Carvalho, C.F., and Stapelfeldt, F. (2008). Reciclagem de aminas na flotação de minério de ferro. *Rem: Revista Escola de Minas*, 61(4), 455–460. doi:10.1590/s0370-44672008000400008.

Boschert, S. and Rosen, R. (2016). Digital twin—the simulation aspect. In *Mechatronic futures*, 59–74. Springer.

Casali, A., Gonzalez, G., Agosto, H., and Vallebuona, G. (2002). Dynamic simulator of a rougher flotation circuit for a copper sulphide ore. *Minerals Engineering*, 15(4), 253–262.

Costa, C.P., Couto, P.H.d.M., Nunes, T.C., and Caldas, F.N. (2018). Sistema Especialista Fuzzy Para Dosagem De Amina No Processo De Beneficiamento De Minério De Ferro. *19o Simpósio de Mineração*, 444–454. doi: 10.5151/2594-357x-32028.

Duarte, R.A., Pinto, T.V., Júnior, Ê.L., Fonseca, A.G., Albuquerque, K.S., and Euzébio, T. (2020). Ganhos de produtividade em um circuito de britagem devido à aplicação de controle override. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 2(1).

Garcia Zuñiga, H. (1935). The efficiency obtained by flotation is an exponential function of time. *Boletim Minero*, 83–86.

Júnior, Ê.L., Ferreira, A.E., Moreira, V.S., and ébio, T. (2019). Projeto de um controlador fuzzy multivariável para uma planta de desaguamento de minério de ferro. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 1(1).

Lima, N.P., Valadão, G.E.S., and Peres, A.E.C. (2013). Effect of particles size range on iron ore flotation. *Rem:*

Revista Escola de Minas, 66(2), 251–256. doi:10.1590/s0370-44672013000200018.

Ma, X., Marques, M., and Gontijo, C. (2011). Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of vale iron ore. *International journal of mineral processing*, 100(3–4), 179–183.

Magalhães, S.A.F. and Euzébio, T. (2019). Controle dmc adaptativo aplicado ao processo de espessamento contínuo. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 1(1).

Reis, L., Júnior, Ê., and Euzébio, T. (2018). Hardware-in-the-loop testing platform of a predictive controller applied to a simulated regrinding circuit. In *6th International Congress on Automation in Mining. GECAMIN*.

Roine, T., Kaartinen, J., and Lamberg, P. (2011). Training simulator for flotation process operators. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 12138–12143.

Seppälä, P., Sorsa, A., Paavola, M., Remes, A., Ruuska, J., and Leiviskä, K. (2014). Pilot plant simulation as a tool for more efficient mineral processing. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 11506–11511.

Seppälä, P., Sorsa, A., Paavola, M., Ruuska, J., Remes, A., Kumar, H., Lamberg, P., and Leiviskä, K. (2016). Development and calibration of a dynamic flotation circuit model. *Minerals Engineering*, 96, 168–176.

Wills, B.A. and Finch, J. (2015). *Wills’ mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann.

Yianatos, J., Carrasco, C., Bergh, L., Vinnett, L., and Torres, C. (2012). Modelling and simulation of rougher flotation circuits. *International Journal of Mineral Processing*, 112, 63–70.