Modelagem de um Tanque de Regularização para Beneficiamento de Minério de Ferro

Pedro Couto * Fernando Souza ** Leonardo Torres **

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil (e-mail: pccoutomoura@gmail.com)*

** *Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil (e-mails: fosouza@ufmg.br, leotorres@ufmg.br)*

Abstract: This paper presents the development and validation of a nonlinear and multivariable model, whose objective is the prediction of level and density dynamics inside tanks that are continuously mixed and fed with multiphase fluids with time varying density. Initially, a generic mathematical model for tanks with continuous agitation is deduced, and then the model is customized for a real case of a tank that feeds a filtration process of a plant of a large mining company in Brazil. The work is concluded with the estimation of parameters and validation of the model using data generated by the real process.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e validação de um modelo não linear e multivariável, cujo objetivo é a predição da dinâmica do nível e da densidade no interior de tanques continuamente misturados e alimentados com fluidos multifásicos e de densidade variável no tempo. Inicialmente, é deduzido um modelo matemático genérico para tanques com agitação contínua e, em seguida, o modelo é configurado para um caso real de um tanque que alimenta um processo de filtragem de uma planta de uma grande mineradora no Brasil. O trabalho é encerrado com a estimação de parâmetros e validação do modelo a partir de dados reais.

Keywords: Modeling; Continuously mixed tanks; Dynamic non-linear systems; System's identification; Filtering.

Palavras-chaves: Modelagem; Tanques continuamente misturados; Sistemas dinâmicos não lineares; Identificação de sistemas; Filtragem.

1. INTRODUÇÃO

O aumento mundial da demanda de ferro nos últimos anos tem estimulado um recente foco de pesquisa em tecnologia de beneficiamento de minério de ferro (Sutherland, 2014). É muito comum a utilização de tanques continuamente misturados com fluidos multifásicos para homogeneização de material em diversas etapas do processo. Normalmente o controle é realizado através de algoritmos PID (Luz et al., 1995). Porém, por se tratar de um processo MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas) e possuir em muitos casos uma dinâmica consideravelmente não linear, o controle clássico pode não ser satisfatório (Slotine and Li, 1990).

Este trabalho tem como motivação, um tanque localizado em uma das usinas de beneficiamento de minério de ferro de uma grande mineradora no Brasil. O tanque está situado na etapa final do processo e recebe todo o material já concentrado e cominuído por várias etapas de processamento, e alimenta a etapa de filtragem. Portanto, trata-se do produto final, que possui alto valor agregado. No caso em questão, a etapa de filtragem do tipo vertical é

realizada através de discos que giram com baixa velocidade (Svarosky, 2000).

Segundo Luz et al. (1995), a realização da separação das fases sólida e líquida é dependente das necessidades específicas do processo e das características da alimentação, dando uma importância especial à concentração de sólidos na polpa e à vazão de alimentação. Portanto, o controle da vazão mássica de alimentação das bacias dos filtros e consequentemente da densidade e vazão volumétrica, são fatores que impactam diretamente na eficiência deste processo.

O minério com índices elevados de umidade gera um elevado custo desnecessário no transporte, que é geralmente realizado por navios (Viana, 2013). Soma-se isso com a crescente preocupação da mineração com a sustentabilidade e questões ambientais (Virgone et al., 2018), e conclui-se que o aumento do percentual de água recirculada nos processos é um objetivo a ser constantemente perseguido (Sutherland, 2014). Tanto o controle de umidade, quanto o aumento do volume de água recuperada, podem ser otimizados com o aumento de eficiência e controle da filtragem, que impacta ainda no aumento de produtividade das usinas.

* Reconhecimento ao PPGEE e à Vale pelo apoio e suporte neste trabalho

De acordo com o World Economic Forum estamos no começo da quarta revolução industrial (Schwab, 2017), onde novos conceitos dentro da Indústria 4.0 levam a uma demanda crescente por métodos avançados de modelagem e modelos de referência cada vez mais específicos (Lasi et al., 2014). O foco deste trabalho destina-se ao desenvolvimento e validação de um modelo dinâmico para a densidade e o nível dos tanques reguladores que alimentam os processos de filtragem e a expansão do modelo genérico encontrado para a abrangência de todas as características de um caso real específico, o que propicia em um segundo momento o controle mais efetivo da vazão mássica de alimentação deste processo. São utilizados dados reais para a definição dos parâmetros e restrições do modelo, bem como para as etapas de simulação e validação do modelo.

2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Na mineração, os tanques de regularização são normalmente cilíndricos e possuem as funções de condicionamento, homogeneização do material e armazenamento do produto gerado pelos processos anteriores. Para tal, normalmente são dotados de um agitador, equipamento acionado por motores que trabalham em constante rotação, e possuem como função principal a mistura da polpa por meio da suspensão de sólidos. A polpa, ao ser constantemente agitada, evita a sedimentação do material, efeito completamente indesejado e que pode levar a sérios entupimentos, colocando em risco a integridade de todos os equipamentos envolvidos, além da possibilidade de perdas de produção com grandes impactos financeiros.

Figura 1. Imagem de um tanque de regularização.

O tanque abordado no presente estudo, mostrado na Figura 1, foi fabricado em aço carbono e revestido de borracha natural. Além das funções de condicionamento, regularização e homogeneização do concentrado, o tanque possui uma importante função de trabalhar como um reservatório de alta capacidade, sendo capaz de absorver distúrbios e manter a filtragem em funcionamento por um tempo considerável. Tal função é requerida, entre outros motivos, em casos de pequenos cortes na alimentação da usina ou de contingenciamentos operacionais de curto prazo do processo. Para isso, o tanque possui um diâmetro

de 12,8m e uma altura de 10,6m, com um volume útil de aproximadamente 1130 m³. O agitador do tanque é acionado por um conjunto motor-redutor que possibilita que o tanque receba uma polpa de minério com alta densidade e sem riscos de sedimentação.

A alimentação principal do tanque é realizada através de uma tubulação em sua parte superior. Desta forma, a polpa de minério de ferro chega ao tanque através de bombeamento conforme mostrado na Figura 2. O fluxo bombeado possui um alto percentual de sólido, transporta a polpa advinda de um espessador de concentrado e possui duas bombas centrífugas que trabalham em paralelo, sendo que posteriormente, tal fluxo é unificado em uma única tubulação e segue com destino ao tanque.

Figura 2. Diagrama de processo do tanque de regularização continuamente misturado

A retirada da polpa agitada ocorre na parte inferior do tanque por meio de duas bombas que também são centrífugas e foram projetadas para funcionarem em paralelo, alimentando duas linhas independentes do processo subsequente de filtragem, cada uma contendo quatro filtros verticais.

Conforme ilustrado na Figura 2, o tanque em questão possui medições de densidade e vazão em quase todos os fluxos que governam sua dinâmica, além de medição de nível em seu interior, fato que garante uma medição precisa das variáveis de interesse desta etapa.

Além do fluxo de entrada principal e dos dois fluxos de saída, o tanque possui outras quatro tubulações de entrada, das quais duas são fluxos alternativos de recirculação de parte dos próprios fluxos de saída, e as outras duas são fluxos que retornam da filtragem. Tais fluxos de recirculação não têm suas vazões e densidades diretamente medidas.

Tanto no fluxo de alimentação nova do tanque quanto em seus fluxos de saída, as bombas de polpa centrífugas são acionadas por inversores de frequência, propiciando a modulação de suas velocidades.

Conforme apresentado na Figura 2, as duas bombas que retiram material do tanque operam em paralelo e encaminham seus fluxos para dois distribuidores de forma independente que, por sua vez, são pressurizados e alimentam o processo de filtragem vertical a vácuo. Os fluxos de saída do tanque possuem medições de vazão volumétrica (FIT) e densidade (DIT) para cada linha. A partir das duas medições de densidade, pode ser gerada uma variável calculada

única (DY), uma vez que as densidades individuais não possuem diferenças significativas em suas dinâmicas.

Para a equalização do balanço de massa no interior do tanque regularizador, ele também recebe os transbordos de todas as bacias dos filtros, sendo estes, considerados como o segundo e terceiro fluxos de entrada do tanque. Nestes fluxos se encontra a maior dificuldade em se realizar uma estimação confiável de suas características, uma vez que nenhuma variável é medida nos mesmos.

Os dois fluxos de saída do tanque possuem opções de recirculação que impactam significativamente a dinâmica do processo. Entre o bombeamento e o distribuidor de cada linha, existe uma válvula do tipo *on/off* que, ao ser aberta, permite que um percentual do fluxo retorne para o tanque e o restante da polpa siga para a filtragem. Portanto, caso as válvulas trabalhem na posição aberta, podem surgir até dois fluxos adicionais na alimentação do tanque, que possuem as mesmas densidades dos fluxos de saída e parte das vazões das respectivas linhas.

3. MODELAGEM

Inicialmente foi desenvolvido um modelo não linear genérico que representa a dinâmica de tanques reguladores com alimentações multifásicas e densidade variável. Em seguida, o modelo desenvolvido foi expandido de forma a abranger o caso real do tanque descrito na Seção 2.

3.1 Desenvolvimento do modelo genérico

As variáveis de interesse que compõem o sistema de um tanque regulador, independentemente da quantidade de fluxos de entrada e saída envolvidos estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição das variáveis iniciais.

Variável	Descrição
f	Vazão volumétrica dos fluxos de saída
ρ	Densidade da polpa nos fluxos de saída
x	% de sólido dos fluxos de saída
w	Vazão mássica dos fluxos de saída
f_e	Vazão volumétrica dos fluxos de entrada
ρ_e	Densidade da polpa nos fluxos de entrada
x_e	% de sólido dos fluxos de entrada
w_e	Vazão mássica dos fluxos de entrada
$w_{e\text{sol}}$	Vazão mássica de sólido dos fluxos de entrada
$w_{e\text{liq}}$	Vazão mássica de líquido dos fluxos de entrada
v	Volume de polpa no tanque
l	Nível do tanque
k	Área da seção transversal do tanque
ρ_{sol}	Densidade de sólidos (constante)

Tendo em vista a compreensão inicial do problema de modelagem até aqui apresentado e a relação entre as variáveis e suas interações, foi desenvolvido um diagrama esquemático, conforme apresentado na Figura 3.

A Figura 3 apresenta um tanque de regularização com fluxos únicos de entrada e saída que contém medições de vazão volumétrica e densidade em ambos, fato que, consequentemente, viabiliza o cálculo de suas vazões mássicas. Além disso, são introduzidos dois parâmetros considerados constantes no modelo: (i) k (área da seção transversal do tanque, também chamado de “ganho de volume” do

Figura 3. Tanque de regularização genérico com medições nos fluxos de entrada e saída, variáveis calculadas e constantes de processo.

tanque) que relaciona o nível do tanque ao seu volume $v = kl$ (Seborg et al., 2004); e (ii) ρ_{sol} (densidade de sólidos) que permite relacionar a densidade ρ da polpa com o percentual x de sólido na polpa, segundo a expressão (Wills and Napier-Munn, 2006, Capítulo 3)

$$x = \left[\frac{\rho_{\text{sol}}}{(\rho_{\text{sol}} - 1000)} \right] \left[\frac{(\rho - 1000)}{\rho} \right] = F(\rho), \quad (1)$$

em que se assumiu que a densidade da água na polpa é de 1000 kg/m^3 .

Este trabalho propõe o levantamento de um modelo que considera variável no tempo as densidades dos fluidos envolvidos, bem como sua evolução temporal no interior do tanque. Tal consideração é condizente com a realidade de vários processos na indústria de mineração, em particular nos tanques reguladores que alimentam os processos de filtragem, devido, entre outros fatores, ao elevado número de fluxos envolvidos. Outro importante fator se dá pela origem do fluxo de alimentação principal vir da saída do processo de espessamento, que apesar de ter como funções principais o adensamento da polpa e a recuperação de água, possui como função secundária a absorção dos distúrbios dos processos anteriores. Resultando assim, na alta variação de sua eficiência e, consequentemente, alta variabilidade da densidade na sua saída (alimentação dos tanques).

Considerando os balanços de massa no tanque, tanto para a mistura de sólidos e líquidos que constitui a polpa, quanto para sólidos somente, pode-se escrever que (Seborg et al., 2004)

$$\frac{d(v\rho)}{dt} = w_e - w = w_{e\text{sol}} + w_{e\text{liq}} - w, \quad (2)$$

$$\frac{d(v\rho x)}{dt} = x_e w_e - x w = w_{e\text{sol}} - x w. \quad (3)$$

A equação (3) pode ser expandida, usando a regra da derivada do produto, tal que

$$x \frac{d(v\rho)}{dt} + (v\rho) \frac{dx}{dt} = w_{e\text{sol}} - x w. \quad (4)$$

Usando (2) em (4), e lembrando que, a partir de (1) tem-se que $x = F(\rho)$ e $\frac{dx}{dt} = \frac{dF}{d\rho} \frac{d\rho}{dt}$, obtém-se

$$(v\rho) \frac{dF}{d\rho} \frac{d\rho}{dt} = w_{e\text{sol}} - F(\rho) w - F(\rho) [w_{e\text{sol}} + w_{e\text{liq}} - w],$$

que pode ser simplificada para

$$(v\rho) \frac{dF}{d\rho} \frac{d\rho}{dt} = w_{e\text{sol}} [1 - F(\rho)] - w_{e\text{liq}} F(\rho).$$

Finalmente, substituindo (1) e $v = kl$ na expressão anterior, tem-se que

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{kl} \left[w_{e_{sol}} \left(\frac{\rho}{\rho_{sol}} \right) + w_{e_{liq}} \left(\frac{\rho}{1000} \right) \right] + \frac{1}{kl} (w_{e_{sol}} + w_{e_{liq}}). \quad (5)$$

Similarmente, a partir de (2) e usando a regra da derivada do produto, tem-se que

$$\rho \frac{dv}{dt} = w_e - w = w_{e_{sol}} + w_{e_{liq}} - w - v \frac{d\rho}{dt}.$$

Substituindo (5) na expressão anterior, lembrando que a relação entre as vazões de saída mássica e volumétrica é dada por $w = \rho f$, e que $v = kl$, obtém-se

$$\frac{dl}{dt} = \frac{1}{k} \left[\frac{w_{e_{sol}}}{\rho_{sol}} + \frac{w_{e_{liq}}}{1000} - f \right]. \quad (6)$$

A validade do modelo dinâmico obtido, representado pelas equações (5) e (6), depende de algumas premissas que não podem ser violadas, sendo uma delas a homogeneidade da polpa no interior do tanque. De acordo com Seborg et al. (2004), esta propriedade pode ser garantida desde que o tanque possua um agitador eficiente e o tempo de residência do material seja significativamente maior que o tempo de mistura. Tal consideração é razoável para os tanques reguladores devido principalmente ao grande volume e presença do agitador. Outra importante premissa é a suposição de que a densidade de sólido do minério é constante. Nesse caso, isto se justifica desde que as características mineralógicas do ROM (*run-of-mine*) não variem abruptamente.

Apesar do modelo se encontrar na sua forma genérica, na qual o fluxo de entrada está representado por duas variáveis ($w_{e_{sol}}$ e $w_{e_{liq}}$), tais variáveis podem ser divididas em diversos fluxos com diferentes características. Essa consideração ganha relevância a medida que aumenta o número de fluxos que alimentam o tanque, assim como a variabilidade das suas vazões e densidades.

O modelo apresentado até aqui possui algumas variáveis que não são normalmente medidas na prática, porém podem ser obtidas através de fórmulas matemáticas fechadas envolvendo variáveis que em geral são medidas. É o caso, por exemplo, de $w_{e_{sol}}$ e $w_{e_{liq}}$, que representam as vazões mássicas de sólido e de líquido dos fluxos de entrada, e podem ser calculadas a partir de medições das variáveis densidade e vazão volumétrica dos mesmos, considerando ainda o parâmetro de densidade de sólido do minério, segundo as relações (Seborg et al., 2004):

$$w_{e_{sol}} = w_e x_e = f_e \rho_e x_e = f_e \left[\frac{\rho_{sol}}{\rho_{sol} - 1000} \right] (\rho_e - 1000), \quad (7)$$

$$w_{e_{liq}} = w_e (1 - x_e) = f_e \rho_e (1 - x_e) = f_e \rho_e - f_e \left[\frac{\rho_{sol}}{\rho_{sol} - 1000} \right] (\rho_e - 1000), \quad (8)$$

na qual uma expressão similar a (1) pode ser usada para calcular x_e .

Para o caso particular em que há somente um fluxo de entrada, as variáveis $w_{e_{sol}}$ e $w_{e_{liq}}$, calculadas em (7) e (8), podem ser automaticamente substituídas no modelo em espaço de estados constituído por (5) e (6). Porém, para casos que possuem mais fluxos, devem ser analisadas todas

as medições existentes, conforme será feito na próxima seção.

3.2 Particularização do modelo para o problema proposto

Como parte da particularização do problema, considerou-se os dois fluxos na saída do tanque, uma vez que o mesmo possui duas bombas e suas velocidades podem ser moduladas de forma independente. Uma outra justificativa para a necessidade de se considerar divisão da vazão de saída em suas componentes individuais é a opção já citada anteriormente de a recirculação para o próprio tanque poder ocorrer somente em uma das linhas, em nenhuma ou em ambas.

Inicialmente foi realizada uma particularização do problema para os fluxos de entrada, dados por:

$$w_e = w_{e_{nova}} + w_{e_{filtrado}} + w_{e_{recirc\ 1}} + w_{e_{recirc\ 2}}, \quad (9)$$

onde $w_{e_{nova}}$ representa a vazão mássica do concentrado do *underflow* do espessador e é o único fluxo que contém um material que incide pela primeira vez no tanque. $w_{e_{recirc\ 1}}$ e $w_{e_{recirc\ 2}}$ representam as parcelas dos fluxos de recirculação de cada linha de saída que retornam para o tanque e $w_{e_{filtrado}}$ abrange todo o material advindo da filtragem, incluindo o transbordo das bacias e dreno dos filtros.

Cada parcela da equação (9) pode ser dividida em subparcelas, de vazão mássica de sólido ($w_{e_{sol}}$) e vazão mássica de líquido ($w_{e_{liq}}$) que as compõem. No caso da alimentação nova (advinda do espessador de concentrado), a vazão mássica total $w_{e_{nova}}$ pode ser substituída diretamente pelas equações (7) e (8) já apresentadas, porém para o respectivo fluxo.

Conforme dito anteriormente, existe a possibilidade de recirculação de parte do fluxo de cada linha de saída individualmente para o tanque, e esta possibilidade é determinada pela posição das válvulas de recirculação. Portanto, as subparcelas das vazões mássicas de sólido advindas da recirculação, $w_{e_{recirc\ 1sol}}$ e $w_{e_{recirc\ 2sol}}$, dependem explicitamente das vazões de cada linha de saída do tanque, das densidades dos mesmos e das posições das válvulas (alimentação da filtragem e alimentação da filtragem com recirculação):

$$w_{e_{recirc\ 1sol}} = (f_1 z_1 r_1) \left[\frac{\rho_{sol}}{\rho_{sol} - 1000} \right] (\rho - 1000), \quad (10)$$

$$w_{e_{recirc\ 2sol}} = (f_2 z_2 r_2) \left[\frac{\rho_{sol}}{\rho_{sol} - 1000} \right] (\rho - 1000), \quad (11)$$

em que z_1 e z_2 representam as posições das válvulas de recirculação e r_1 e r_2 os percentuais de recirculação dos fluxos de saída das linhas 1 e 2.

O quarto e último fluxo de entrada no tanque é a vazão mássica de retorno da filtragem, que faz referência ao transbordo das bacias e drenagem dos oito filtros que retornam para o tanque. Este fluxo não possui nenhum tipo de medição e, por esta razão, a parcela sólida $w_{e_{filtrado_{sol}}}$ é representada pela vazão mássica multiplicada pelo percentual de sólido, conforme já utilizado anteriormente

$$w_{e_{filtrado_{sol}}} = w_{e_{filtrado}} x_{filtrado}, \quad (12)$$

onde $x_{filtrado}$ representa o percentual de sólido do fluxo relativo ao filtrado.

O somatório das subparcelas em (9), após algumas manipulações algébricas, pode ser reduzida à seguinte expressão:

$$w_{e_{sol}} = \left[\frac{\rho_{sol}}{\rho_{sol} - 1000} \right] \left[f_e(\rho_e - 1000) + (\rho - 1000)(f_1 z_1 r_1 + f_2 z_2 r_2) \right] + w_{e_{filtrado}} x_{filtrado} \quad (13)$$

Finalmente, a partir de (13) e considerando que a vazão mássica de entrada total é a soma das vazões mássicas de entrada de sólido e líquido totais, é possível calcular a vazão mássica de líquido total de entrada no tanque:

$$w_{e_{liq}} = f_e \rho_e + (f_1 z_1 r_1 \rho) + (f_2 z_2 r_2 \rho) + w_{e_{filtrado}} - w_{e_{sol}} \quad (14)$$

As novas variáveis inseridas nessa seção, bem como suas descrições, estão sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição das variáveis dos fluxos adicionais

Variável	Descrição
f_1	Vazão volumétrica do fluxo de saída da linha 1
z_1	Posição da válvula de recirculação do fluxo de saída da linha 1 (o fechada / 1 aberta)
r_1	% de recirculação do fluxo de saída da linha 1
f_2	Vazão volumétrica do fluxo de saída da linha 2
z_2	Posição da válvula de recirculação do fluxo de saída da linha 2 (o fechada / 1 aberta)
r_2	% de recirculação do fluxo de saída da linha 2
$w_{e_{filtrado}}$	Vazão mássica do fluxo de transbordo do filtrado
$x_{filtrado}$	% de sólido do fluxo de transbordo do filtrado

As equações (5), (6), (13) e (14) compõem a representação em espaço de estados para o caso particular do tanque de alimentação do processo de filtragem considerado.

4. IDENTIFICAÇÃO DO MODELO E RESULTADOS NUMÉRICOS

Para a estimação de parâmetros e posterior validação do modelo, os dados compartilhados pela mineradora são expostos neste trabalho com os valores das respectivas faixas de variação normalizados entre zero e um, conforme sugere (Goldschmidt et al., 2015).

Foram realizados testes com o objetivo de coletar informações a partir de diferentes distúrbios e excitações que comumente ocorrem no processo. Os dados foram divididos em dois grupos, sendo o primeiro utilizado para a estimação dos parâmetros e o segundo para a validação do modelo (Ljung, 1987).

Conforme apresentado anteriormente, o único distúrbio não medido no processo é o fluxo que retorna da filtragem, que é composto por duas tubulações que recebem dezesseis possíveis fluxos, sendo eles o material que transborda da bacia de cada um dos oito filtros e os respectivos fluxos de dreno. A vazão mássica e o percentual de sólido referente aos transbordos das bacias variam de acordo com a eficiência de cada filtro, que é impactada, entre outros

aspectos, pelo estado e frequência de lavagem das telas, vazão mássica de alimentação, velocidade de rotação e pressão de vácuo. Já as parcelas de drenagem ocorrem devido ao desligamento dos filtros.

A primeira etapa para a realização das simulações foi a definição do tempo de amostragem dos dados como o menor tempo possível que garante um sincronismo entre todas as variáveis, levando em consideração as diferentes frequências de armazenamento do sistema PIMS¹. Apesar deste processo trabalhar com vazões consideravelmente grandes, o enorme volume do tanque dita uma dinâmica muito lenta em seu interior, o que possibilita um certo grau de liberdade na frequência de amostragem sem perda significativa de informação, garantindo um desempenho satisfatório com a coleta a cada $T = 5$ s.

De posse dos dados amostrados e equalizados no tempo, a próxima etapa foi o levantamento dos atrasos de todos os fluxos envolvidos no processo, com atenção especial para a alimentação do tanque, em virtude da extensão da tubulação que liga os processos de espessamento e filtragem, onde o tanque está localizado. Entre os medidores de vazão e densidade, que se encontram próximos ao espessador, e a chegada do material ao tanque, foi levantado um tempo morto de aproximadamente 325 segundos. Esse e outros atrasos considerados são apresentados na Tabela (3).

Tabela 3. Atrasos de tempo dos fluxos até o tanque

Fluxo	Tempo morto (s)
$w_{e_{nova}}$	325
$w_{e_{filtrado}}$	35
$w_{e_{recirc\ 1}}$	98
$w_{e_{recirc\ 2}}$	103

Antes do início das simulações, se faz necessário mais uma decomposição de fluxos, especificamente de $w_{e_{filtrado}}$, que conforme já apresentado, pode ser inicialmente dividido em um fluxo de retorno do transbordo das bacias dos filtros e outro de descarga devido à drenagem dos mesmos ($w_{e_{dreno}}$). É relevante o fato de que o transbordo das bacias dos filtros é mais alto nos momentos em que apenas um filtro do distribuidor se encontra em funcionamento, uma vez que o volume que recircula é consideravelmente menor que o volume que alimenta o filtro em operação. Somando-se às conclusões apresentadas, o fato de que o transbordo das bacias varia de acordo com a eficiência dos filtros em operação, foi necessária uma subdivisão dessa parcela em quatro componentes:

$$w_{e_{filtrado}} = w_{e_{filtrado_{rec1}}} + w_{e_{filtrado_{rec2}}} + w_{e_{filtrado_1}} + w_{e_{filtrado_2}} + w_{e_{dreno}}, \quad (15)$$

na qual $w_{e_{filtrado_{rec1}}}$ e $w_{e_{filtrado_{rec2}}}$ representam as vazões mássicas dos fluxos de transbordo das bacias dos filtros das linhas 1 e 2 quando as válvulas z_1 e z_2 estão abertas (presença de recirculação), e $w_{e_{filtrado_1}}$ e $w_{e_{filtrado_2}}$ representam os mesmos fluxos na ausência de recirculação (z_1 e z_2 fechadas).

No modelo (5), (6), (13) e (14) as variáveis podem ser classificadas em: parâmetros a serem identificados, variáveis medidas, e estados do modelo. Os parâmetros a serem estimados e suas condições de contorno estão apresentados

¹ Process Information Management System.

na Tabela 4. O parâmetro d_{ini} (condição inicial de densidade nos fluxos de saída do tanque) é necessário devido à ausência de medição dessa variável, diferente do que ocorre com o nível, que tem como condição inicial o primeiro valor medido dos dados utilizadas nas simulações.

Tabela 4. Parâmetros do modelo.

Parâmetro	Descrição	Faixa
k	Ganho de volume do tanque	[100;110]
ρ_{sol}	Densidade de sólido do minério	[4,95;5,05]
r_1	% de recirculação do fluxo 1	[0,2;0,4]
r_2	% de recirculação do fluxo 2	[0,2;0,4]
$w_{filtrado_{rec1}}$	Vazão mássica com recirculação f1	[0;400]
$w_{filtrado_{rec2}}$	Vazão mássica com recirculação f2	[0;400]
$w_{filtrado_1}$	Vazão mássica sem recirculação f1	[0;300]
$w_{filtrado_2}$	Vazão mássica sem recirculação f2	[0;300]
w_{dreno}	Vazão mássica de drenagem	[800;1100]
$x_{filtrado}$	% de sólido do retorno da filtragem	[0,2;0,35]
d_{ini}	Condição inicial de densidade	[1,8;2,2]

4.1 Estimação dos parâmetros

Modelos dinâmicos frequentemente contêm parâmetros desconhecidos cujos valores são difíceis de determinar mesmo com experimentos altamente especializados. Uma abordagem prática é estimar esses parâmetros a partir dos dados de processo disponíveis (Li et al., 2004). Para isso utilizou-se a primeira janela de dados obtida de forma a minimizar o erro quadrático de acordo com a seguinte função objetivo (Dochain and Vanrolleghem, 2001) (considerando as restrições na Tabela 4):

$$J = \sum_{k=1}^N \left(\frac{l(kT) - \hat{l}(kT)}{\Delta L} \right)^2, \quad (16)$$

sendo que $l(kT)$ representa o nível medido no instante kT , e $\hat{l}(kT)$ o valor do nível obtido a partir da simulação do modelo (equações integradas usando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem e tempo de integração igual ao intervalo de amostragem), e o fator de normalização $\Delta L = \max_n[l(nT), \hat{l}(nT)] - \min_n[l(nT), \hat{l}(nT)]$, de modo que J é normalizado dentro da faixa de variação efetiva dos dados em cada janela, que é diferente da faixa utilizada na normalização para a apresentação das escalas de variação, o que se traduz em um critério mais rigoroso para a análise de seu valor absoluto.

A janela de dados utilizada na etapa de estimação dos parâmetros contém vários distúrbios sequenciais, a fim de capturar a resposta do modelo a diferentes cenários e pontos operacionais (Aguirre, 2015).

O teste tem início com 2 filtros em funcionamento (um em cada distribuidor) e as duas válvulas de recirculação abertas. A primeira sequência de distúrbios gerada consiste na aceleração da bomba de saída, ligação de um segundo filtro, e fechamento da válvula de recirculação, todos no fluxo de saída 1. Como consequência, ocorre uma elevação da vazão do fluxo de saída e uma queda na vazão do fluxo de transbordo das bacias dos filtros (uma vez que a alimentação do distribuidor passa a ser dividida para dois filtros), além da eliminação do fluxo de recirculação da linha 1. Em sequência, ocorre uma queda na vazão da entrada principal e, após um pequeno período de estabilização, é gerada uma nova sequência de distúrbios,

com a parada de um filtro na linha 1 e consequentemente abertura das válvulas de dreno e de recirculação, além da desaceleração da bomba. A drenagem do filtro representa uma descarga significativa com duração aproximada de 105 segundos.

Figura 4. Evolução temporal das vazões volumétricas do tanque.

Figura 5. Evolução temporal das posições das válvulas de recirculação e drenagem do tanque.

As figuras 4 e 5 apresentam a evolução temporal das vazões volumétricas de entrada e de saída do tanque, assim como as posições das válvulas de recirculação e de dreno das linhas, respectivamente, onde é possível observar graficamente todos os distúrbios detalhados anteriormente para janela de estimação dos parâmetros.

Os parâmetros estimados através da otimização de (16) são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5. Parâmetros estimados do modelo

Parâmetro	Valor estimado	$w_{filtrado}$
k	106,61	
ρ_{sol}	5,03	
r_1	0,25	
r_2	0,25	
$w_{filtrado_{rec1}}$	135,00	
$w_{filtrado_{rec2}}$	250,00	
$w_{filtrado_1}$	100,00	
$w_{filtrado_2}$	100,00	
w_{dreno}	995,00	
$x_{filtrado}$	0,3	
d_{ini}	2,01	

A figura 6 apresenta a evolução temporal dos níveis medido e estimado pelo modelo que, mesmo na presença de diferentes distúrbios sequenciais, apresenta uma boa assertividade, sendo capaz de realizar alterações precisas na inclinação e inversões de sentido de integração seguindo uma dinâmica muito próxima do nível medido. É importante ressaltar que a característica integradora do nível traz uma grande dificuldade para o modelo, uma vez que

Figura 6. Evolução temporal dos níveis medido e estimado.

Figura 7. Evolução temporal da densidade medida do fluxo de entrada e estimada dos fluxos de saída.

qualquer mínimo erro tende a ser amplificado, levando a grandes divergências a longo prazo.

A figura 7 apresenta na mesma escala a evolução temporal da densidade estimada pelo modelo para os fluxos de saída e da densidade medida do fluxo principal de entrada. Apesar da ausência de medição da primeira, ao comparar seu valor estimado com a segunda, é possível observar que elas seguem uma mesma tendência a médio prazo e que o tanque se comporta como um filtro para as variações na densidade de entrada, o que era esperado devido ao grande volume e a homogeneização em seu interior, enfatizando seu caráter capacitivo.

4.2 Validação do modelo

Para a validação do modelo foi obtida uma nova janela de dados, que contém em sequência, grande parte dos potenciais distúrbios do processo. Durante a simulação foram utilizados os mesmos valores estimados anteriormente para os parâmetros.

O teste se inicia com três filtros em operação, sendo dois na linha 1 e um na linha 2, com apenas a válvula de recirculação da segunda linha aberta. No primeiro momento, ocorreu a desaceleração das bombas de saída das duas linhas e a abertura do dreno de um filtro, com duração aproximada de 135 s, e a manutenção do funcionamento do mesmo. Em seguida ocorreu uma aceleração nas bombas dos fluxos de saída, a inserção do segundo filtro na linha 2 e o fechamento da sua válvula de recirculação. Neste momento o contexto passa a ser de uma operação com quatro filtros e ausência de recirculação nas duas linhas. A bomba do fluxo de saída 1 é levemente desacelerada, um de seus filtros é parado e a válvula de recirculação aberta. Apesar do circuito voltar a operar com três filtros no total, a recirculação inicial ocorria somente na linha 2 e neste momento passa a ocorrer na linha 1. A parada do último filtro ocasionou a drenagem do mesmo, com a

mesma vazão e duração de tempo da etapa de estimação dos parâmetros.

Figura 8. Evolução temporal das vazões volumétricas do tanque.

Figura 9. Evolução temporal das posições das válvulas de recirculação e drenagem do tanque.

As figuras 8 e 9 apresentam a evolução temporal das variáveis de interesse para sequência de geração dos distúrbios, da mesma forma que foi apresentado na etapa de estimação dos parâmetros. Alguns dos parâmetros estimados para o modelo podem ser considerados estáticos e representam grandezas físicas, características mineralógicas ou percentuais de fluxos, porém, outros são dinâmicos, como no caso de condições iniciais e dos fluxos não medidos, que dependem de vários fatores como a eficiência dos filtros que se encontram em operação e a velocidade de rotação dos discos. Os últimos foram novamente estimados e estão representados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros dinâmicos estimados na etapa de validação dos dados

Parâmetro	Descrição	Valor
$w_{\text{filtrado}_{\text{rec}1}}$	Vazão mássica com recirculação f1	350,00
$w_{\text{filtrado}_{\text{rec}2}}$	Vazão mássica com recirculação f2	225,00
w_{filtrado_1}	Vazão mássica sem recirculação f1	150,00
w_{filtrado_2}	Vazão mássica sem recirculação f2	260,00
d_{ini}	Condição inicial de densidade	2,0

As figuras 10 e 11 apresentam as dinâmicas do nível e densidade medidos e inferidos, e semelhante ao que ocorreu com a janela de dados utilizada na etapa de estimação de parâmetros, o modelo de nível possui boa assertividade, respondendo muito bem a todos os distúrbios gerados. O modelo de densidade, por sua vez, apresenta em sua dinâmica uma tendência de diluição e estabilização em um patamar mais baixo que a densidade do fluxo de entrada principal. Isso se deve, principalmente, à constante presença do fluxo de retorno do transbordo das bacias, cujo percentual de sólido é muito inferior ao do fluxo principal. Esse fato somado ao enorme volume do tanque

Figura 10. Evolução temporal das vazões volumétricas de saída do tanque.

Figura 11. Evolução temporal dos níveis medido e estimado.

justifica considerar a variação de densidade no modelo, com impacto também na dinâmica do nível, o que difere da consideração clássica de modelagem linear com densidade constante utilizada em diversos trabalhos.

Para uma análise quantitativa do desempenho do modelo obtido para cada janela de dados, foi utilizado o critério E_{RMS} (raiz quadrada do erro quadrático médio), cujo cálculo é realizado através da equação (Willmott et al., 1985)

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\sum_{k=1}^N \left(\frac{l(kT) - \hat{l}(kT)}{\Delta L} \right)^2 \right]}, \quad (17)$$

em que o mesmo fator de normalização usado em (16) foi empregado, e os resultados estão apresentados na Tabela 7. Observa-se que os erros RMS para estimação do nível foram inferiores a 5%, tanto na etapa de estimação, quanto na etapa de validação.

Tabela 7. Critério de desempenho do modelo

Janela de dados	E_{RMS}	J
Estimação de Param.	0,0430	1,1766
Validação	0,0331	0,5002

5. CONCLUSÃO

Como o projeto original da planta não contempla medidores de densidade para os fluxos de saída, só foi possível mensurar o desempenho do modelo a partir da comparação do nível estimado do tanque com os valores medidos. Com base na validação numérica apresentada, pode-se afirmar que o trabalho cumpriu o objetivo proposto, ou seja, o modelo não linear em espaço de estados obtido representa bem a dinâmica de tanques de regularização para beneficiamento de minério de ferro, com um indicador

de desempenho do erro $ERMS < 5\%$ para a estimativa do nível do tanque. Pode-se verificar também a relação qualitativa esperada de causa e efeito na densidade de saída quando comparada com a densidade de entrada e as demais variáveis do modelo, em que o tanque representa um grande filtro para a variações de entrada. Deseja-se, como trabalho futuro, a realização de novos testes no mesmo tanque (após a inserção de medidores de densidade em sua saída) e em outros semelhantes para uma validação do modelo em todos os seus estados, além da utilização do modelo desenvolvido para a estimação da densidade da polpa no tanque e das entradas desconhecidas, tais como as vazões de entrada associadas aos transbordos dos filtros.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (2015). *Introdução à Identificação de Sistemas*. Editora UFMG, 4rd edition.
- Dochain, D. and Vanrolleghem, P.A. (2001). *Dynamical Modelling and Estimation in Wastewater Treatment Process*. IWA Publishing, 1st edition.
- Goldschmidt, R., E.Passos, and E.Bezerra (2015). *Data Mining*. Elsevier Editora Ltda, 2rd edition.
- Lasi, H., Kemper, H.G., Fettke, P., Feld, T., and Hoffmann, M. (2014). *Industry 4.0*. Business & Information Systems Engineering.
- Li, R., Henson, M.A., and Kurtz, M.J. (2004). *Selection of model parameters for off-line parameter estimation*. IEEE.
- Ljung, L. (1987). *System identification - theory for the user*.
- Luz, A.B., Sampaio, J.A., and França, S.C.A. (1995). *Tratamento de minérios*. CETEM, 5nd edition.
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Penguin Books.
- Seborg, D.E., Edgar, T.F., and Mellichamp, D.A. (2004). *Process Dynamics and Control*. METU LIBRARY, 2nd edition.
- Slotine, J.J. and Li, W. (1990). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.
- Sutherland, K. (2014). *Mining: Filtration prospects for the iron ore mining industry*. Filtration and Separation.
- Svarosky, L. (2000). *Solid-Liquid Separation*. Reed educational and professional, 4nd edition.
- Viana, S. (2013). *Microwave-based Moisture Measurement of Bauxite Ore on Conveyor Belts*. Engineering and Mining Journal.
- Virgone, K.M., Ramirez-Andreotta, M., Mainhagu, J., and Brusseau, M.L. (2018). *Effective integrated frameworks for assessing mining sustainability*. Environmental Geochemistry and Health.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., and Rowe, C.M. (1985). *Statistics for the Evaluation and Comparison of Models*. Journal of Geophysical research.
- Wills, B.A. and Napier-Munn, T.J. (2006). *Mineral processing technology*. Elsevier Science & Technology Books, 7nd edition.