

SISTEMA DE CONTROLE GRANULOMÉTRICO DE PELotas DE MINÉRIO DE FERRO: UM ESTUDO DE CASO

ÍTALO S. M. DIAS, FREDERICO G. GUIMARÃES, MARCONE J. F. SOUZA

*Programa de Pós-graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos em Mineração
Instituto Tecnológico Vale / Universidade Federal de Ouro Preto
Av. Juscelino Kubitschek, 31, Ouro Preto - MG, 35400-000*

E-mails: italo.dias@vale.com, fredericoguimaraes@ufmg.br, marccone@ufop.edu.br

Abstract— This paper aims at developing a control system for iron ore balling circuit, handling the water addition in balling drum. The goal is to reach the control of the granulometry of pellets and, in consequence, make the process more uniform, avoiding both reworks and the increase of the costs related to the process. To achieve this goal, the present process behaviour was analysed. For this purpose, it was necessary to identify and quantify the amount of variables by using the Plant Information Management System (PIMS) and applying tests, such as step response test, to obtain the mathematical model. Based on the process analyses, control strategies were identified to implement the necessary improvements. In the development of the project we used software and hardware tools that are commonly used in the plant, such as logic controllers, supervisory system, plant information management system, MATLAB for identifying the process model and SIMULINK for simulations and development of controllers.

Keywords— Control, automation, pelletizing, granulometry, and balling.

Resumo— Este artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de controle para o circuito de pelotas de minério de ferro, pela manipulação da adição de água nos tambores de pelotamento. O objetivo é alcançar o controle da granulometria das pelotas e, conseqüentemente, tornar o processo mais uniforme, evitando tanto o retrabalho quanto o aumento dos custos relacionados ao processo. Para alcançar este objetivo, o comportamento do processo atual foi analisado. Para esse propósito, foi necessário identificar e quantificar a quantidade de variáveis usando o Sistema Gerenciador de Informações da Planta e aplicar testes, como o de resposta ao degrau, para obter o modelo matemático. Com base nas análises do processo, foram identificadas estratégias aplicáveis ao controle para implementar as melhorias necessárias. No desenvolvimento do projeto foram utilizadas ferramentas de software e hardware que são comumente usadas na planta, como controladores lógicos, sistema de supervisão, sistema de gerenciamento de informações da planta, MATLAB para identificação do modelo do processo e o SIMULINK para simulações e desenvolvimento dos controladores.

Palavras-chave— Controle, automação, pelotização, granulometria e pelotamento.

1 Introdução

A busca pelo aperfeiçoamento dos processos produtivos deve ser sempre perseguida nos segmentos industriais. A automação e o desenvolvimento de controles de processos propiciam diversos tipos de melhorias que tendem a trazer vários benefícios, tais como maior produtividade, maior qualidade, menor variabilidade dos processos e produtos, e maior segurança para as pessoas.

A cada dia o mercado mundial se torna mais competitivo e, conseqüentemente, exige maior qualidade dos produtos de modo geral. Na mineração vários desafios são enfrentados, principalmente na obtenção de uma melhor qualidade do minério, visto a grande variabilidade que existe em diferentes jazidas e também nos diferentes processos utilizados para recuperar e concentrar o minério de ferro.

Dentre os processos que envolvem toda a cadeia produtiva da mineração de minério de ferro, está o de pelotização. Neste, a qualidade e a uniformidade do produto devem atender aos padrões exigidos. Uma forma de melhorar tanto o produto, quanto o processo é garantir, por meio de ferramentas de controle e automação, a uniformidade das etapas de todo o processo produtivo. Ao garantir uniformidade e estabele-

cer, conseqüentemente haverá melhor desempenho operacional e redução de custos.

O trabalho abordado tem seu foco na planta de pelotização da Mina de Fábrica, uma das usinas de pelotização do Estado de Minas Gerais. Essa usina possui uma particularidade em relação às outras usinas de pelotização existentes no país, que é o fato de o pelotamento utilizar tambores, e não discos. Esta é uma característica presente em poucas usinas de pelotização de minério de ferro no mundo.

O trabalho aqui apresentado busca propor soluções aos problemas atualmente existentes na planta, tais como variabilidade de qualidade e custo operacional elevado.

1.1 Caracterização do processo

O processo de pelotização consiste em recuperar os finos, que são minúsculas partículas de minério de ferro. De acordo com Pietsch (1991), a pelotização é o processo que envolve a aglomeração de pequenas esferas (pelotas) e possui uma etapa para endurecimento destas por meio de calor. Segundo Meyer (1980), as pelotas são esferas produzidas a partir de concentrados de minérios de ferro de diferentes composições mineralógicas e químicas com algumas propriedades notáveis, tais como:

- Tamanho em uma faixa de 9 a 15 mm;
- Alta porosidade, em uma faixa de 25 a 30%;
- Teor de ferro superior a 63%;
- Baixa perda de ignição;
- Alta resistência mecânica;
- Resistência à abrasão em um valor adequado, evitando perdas no transporte;
- Resistência mecânica suficiente mesmo em estresse térmico sob atmosfera redutora.

Pelo processo de pelletização, o minério irá aglomerar uma quantidade de material mais concentrado, obtendo, desta forma, um produto que possui maior valor agregado e que tende a favorecer a melhoria dos processos siderúrgicos, como os de altos-fornos.

Na Figura 1 é mostrado o fluxograma do processo de pelletização da Mina de Fábrica, sendo possível identificar as etapas e a sequência do processo.



Figura 1. Processo de Pelotização da Mina de Fábrica

Entendendo que o processo de pelletização é composto por diferentes etapas, tais como moagem, filtração, mistura, pelletamento, queima e peneiramento, foi definido como foco deste projeto de pesquisa a etapa de pelletamento. O intuito é desenvolver soluções para o controle desta etapa do processo, com base em análises para identificação de pontos de melhoria e impactos nos processos posteriores à etapa em foco.

Na Figura 2 é apresentado o fluxograma, simplificado, do circuito de pelletamento da planta da Mina de Fábrica, em que se mostra alguns equipamentos componentes do processo.

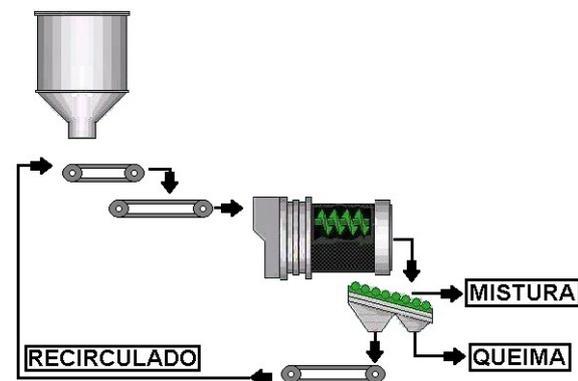


Figura 2. Etapa de Pelotamento da Mina de Fábrica

Segundo Pietsch (1991), o pelletamento é a etapa em que ocorre a aglomeração do material, ou seja, a formação de pelotas verdes (cruas), por meio da rotação deste material em algum equipamento (tambor, ou disco) com a adição de algum tipo de aglutinante. De

acordo com a velocidade de rotação as partículas se colidem e ocorre a aglomeração.

A etapa de pelletamento utiliza um conjunto de equipamentos, tais como:

- Balanças dosadoras: equipamentos responsáveis por alimentar o pelletamento com o material proveniente da mistura, onde foram adicionados insumos para aglomeração;
- Transportadores de correia: utilizados para transportar o minério até a alimentação do tambor de pelletamento;
- Tambor de pelletamento: equipamento responsável pela formação das pelotas. De acordo com a alimentação, velocidade de rotação, adição de insumos e características físicas e químicas do minério, aos poucos, o material é aglomerado, e assim passa para a próxima etapa;
- Peneira de rolos classificadora: equipamento responsável por classificar as pelotas de acordo com a granulometria. As pelotas são divididas em 3 grupos, pequenas (retornam para o início do pelletamento), médias (seguem para a etapa de queima), e grandes (voltam para a etapa de mistura).

Os tambores de pelletamento possuem outros componentes que estão diretamente relacionados com o seu funcionamento. Estes são os injetores de água e o raspador (*scraper*). Na Figura 3 é mostrado um diagrama do tambor de pelletamento:

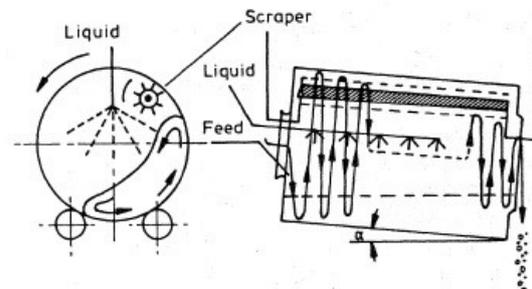


Figura 3. Diagrama do tambor de pelletamento

Para este processo devem ser levadas em consideração algumas características do minério e do processo, tais como:

- Quantidade de insumos adicionados para aglomeração do minério;
- Quantidade e qualidade do minério utilizado;
- Superfície específica do *pellet feed*;
- Umidade do material;
- Velocidade de rotação do tambor para formação das pelotas;
- Injeção de água no processo, que é utilizada como fator de correção para adequar a granulometria, quando necessário.

Além disso, devem ser considerados os impactos da manipulação de determinados insumos em todos os processos. Um exemplo é o fato da injeção de água aumentar a umidade da pelota e por consequência exigir maior consumo de gás natural na fase de queima.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos visando propor melhorias tanto para o processo de pelotização, quanto para a etapa de pelotamento.

Abouzeid e Seddik (1981) abordam as propriedades do minério de ferro e os impactos em relação ao pelotamento.

Rapp e Nyman (2003) sugerem uma abordagem mais ampla em relação ao pelotamento. Eles contemplam em seu artigo a variação da amplitude do produto na etapa de aglomeração de pelotas e sugerem uma abordagem de todo o processo.

O trabalho desenvolvido por Nunes (2007) traz uma abordagem mais relacionada aos aspectos de qualidade das pelotas, mostrando as influências que cargas circulantes do pelotamento podem ter em pelotas verdes e queimadas, relacionando também a qualidade do *pellet feed* utilizado no processo.

1.2 Medição da granulometria

Para mensurar o tamanho das pelotas são necessários instrumentos específicos. O trabalho desenvolvido por Nunes (2004) aborda a aplicação do reconhecimento de imagens para obtenção da granulometria. O trabalho apresentado por Thurley e Anderson (2008) mostra um protótipo para visualização 3D das pelotas, o que auxilia na medição, em tempo real, da granulometria das pelotas.

Devido aos estudos realizados para a obtenção de granulometria via reconhecimento de imagens e por existirem ferramentas no mercado que possibilitam tal recurso, foi adotado para o desenvolvimento do trabalho aqui proposto, a medição granulométrica através de reconhecimento de imagem.

Na Figura 4 é mostrada a imagem obtida pelo sistema de medição adotado.

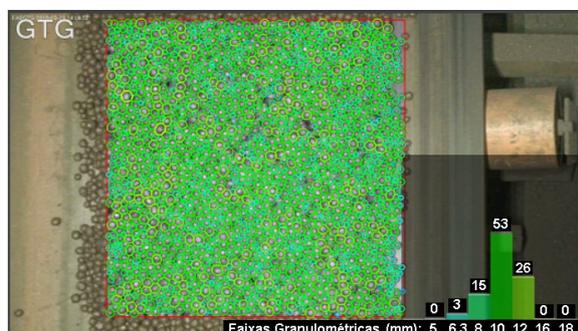


Figura 4. Imagem da medição granulométrica

Após a classificação das pelotas pela peneira de rolos, é realizada, com a utilização de câmeras industriais, a captura de imagens. Em seguida, estas são processadas em um servidor que aplica técnicas de reco-

nhecimento de padrões e provê informações, tais como a média da granulometria, a dispersão das pelotas nas faixas granulométricas, desvio padrão, dentre outras.

Foram adotadas na implantação do sistema de medição as seguintes faixas de granulometria:

- 5 mm a 6,3mm;
- 6,3 mm a 8 mm;
- 8 mm a 10 mm;
- 10 mm a 12,5 mm;
- 12,5 mm a 16 mm;
- 16 mm a 18 mm.

2 Descrição do Problema

Na etapa de pelotamento é necessário obter uma granulometria que atenda às necessidades dos clientes, juntamente com outras características de qualidade. Tais características podem ser a abrasão, a compressão, o teor de minério, dentre outras.

Segundo Chagas *et al.* (2015), havendo maior homogeneidade granulométrica, tende a ocorrer menor consumo de combustível, o que reduz os custos operacionais.

De acordo com Matos (2007), a granulometria heterogênea afeta negativamente a permeabilidade do forno.

Para adequar a granulometria, é necessário manipular algumas variáveis componentes do processo e atentar para os impactos que podem ocorrer em outras características, ou seja, a busca pela melhoria da granulometria pode interferir em outras características de qualidade, o que pode ser prejudicial ao processo e ao produto. Portanto, deve-se entender o comportamento do processo e manipular de forma correta cada variável.

Atualmente a injeção de água nos tambores de pelotamento é feita com operação manual, ficando o controle diretamente relacionado com o conhecimento do operador. A frequência do inversor, responsável pela velocidade de rotação dos tambores, está fixa em 60 Hz, o que impossibilita a manipulação de velocidade para obter melhores resultados relacionados a granulometria. Portanto, o processo não possui controle automático, ficando a manipulação das válvulas injetoras de água a cargo da interação dos operadores de campo.

A classificação granulométrica atual é feita através da mesa de rolos, que classifica as pelotas em faixas em torno de 8 mm a 18 mm. Pelotas pequenas retornam para o início da etapa de pelotamento. Pelotas grandes retornam para a etapa de mistura, ou seja, retornam para a etapa anterior ao pelotamento.

Rotineiramente os operadores verificam a taxa de retorno de pelotas pequenas de cada linha de pelotamento. De acordo com a taxa de retorno é tomada alguma ação manual de controle.

A alta taxa de retorno causa retrabalho no processo, o que traz baixa produtividade, e pode acarretar sobre-

carga nos equipamentos, assim tendendo a elevar os custos de manutenção.

Comumente, os operadores de campo atuam adicionando água nos tambores de pelotamento quando a taxa de retorno tende a aumentar. Embora essa seja uma prática habitual, a adição de água, sem o devido controle, também pode ser prejudicial ao processo, pois exigirá mais quantidade de gás natural na etapa posterior que é onde ocorre o endurecimento das pelotas, ou seja, na etapa de queima. Ocorrendo maior consumo de gás, os custos operacionais tendem a se elevar.

Para adequar a granulometria é necessário controlar de forma automática as variáveis que interferem no processo. No projeto, aqui apresentado, é mostrada a automatização da injeção de água nos tambores e analisados os resultados obtidos.

3 Solução Proposta

Entendendo a necessidade de automatizar a injeção de água nos tambores, primeiramente foram discutidas e analisadas, com a equipe de operação e processo, as características pertinentes à adição de água.

Existe a possibilidade de injetar água logo na alimentação no tambor, no retorno de pelotas pequenas e internamente. Na adição interna existem dois pontos, um mais próximo à entrada de material, e outro próximo à descarga.

O ponto interno mais próximo à entrada de material contribui para a variação da granulometria e também para manter a pista do tambor umedecida. Desta forma, evita-se um fenômeno conhecido como arraste de material, que dificulta a formação de pelotas. Por tal motivo, foi proposta a automação da injeção de água no ponto mencionado, bem como o desenvolvimento de um sistema de controle para a melhoria da granulometria.

Segundo Vidal (2015), um sistema de controle consiste de uma interconexão de componentes para produzir uma resposta desejada de acordo com a configuração adotada para aquele sistema.

Como o intuito é deixar a granulometria mais homogênea, o controle buscará maximizar a faixa de 12,5 mm a 16 mm. Para controlar a granulometria mediante a manipulação da adição de água foi definida a utilização de controle Proporcional e Integral (PI) em cascata. Segundo Shinsky (1979), o controle em cascata é aquele no qual a saída de um controlador é utilizada para manipular o *set point* de outro controlador. Na concepção do controle em cascata existe a malha primária e a malha secundária. A malha primária possui o *set point* independente, já a secundária depende da saída do controlador primário como *set point*. Na Figura 5 é mostrado o diagrama de controle em cascata.

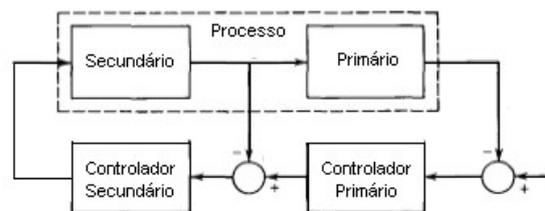


Figura 5. Diagrama do controle em cascata

Como o objetivo é controlar a faixa granulométrica, esta é a malha primária, e a vazão a secundária. De acordo com o *set point* requerido da faixa granulométrica, o *set point* de vazão de água é determinado.

4 Desenvolvimento

Para analisar a quantidade de água, que é adicionada ao processo, foi instalado um medidor de vazão com faixa de 0 a 20 litros/minuto. Posteriormente, foi instalada uma válvula controladora. Após as instalações foram efetuados testes de resposta ao degrau relacionando a abertura da válvula com a vazão obtida.

O teste consistiu em aplicar uma variação de abertura na válvula, primeiramente de 15% para 25%, em seguida de 25% para 5%, e finalizando com a variação de 5% para 15%.

Na Figura 6 é mostrado o gráfico com a sequência de degraus aplicados.

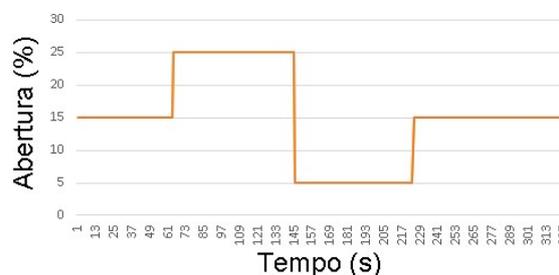


Figura 6. Gráfico de abertura da válvula

Na Figura 7 é mostrada a resposta da vazão mediante a aplicação dos degraus apresentados na Figura 6.

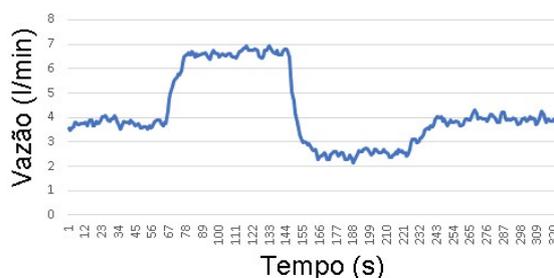


Figura 7. Gráfico de vazão

Com o teste de resposta ao degrau é possível obter o modelo do processo. Para obter o modelo foi utiliza-

da a ferramenta *System Identification Toolbox* do software MATLAB (MATLAB, 2017), que é voltado para matemática computacional.

Observou-se variação da vazão mediante as mudanças na abertura da válvula.

Com o teste efetuado, os dados foram inseridos no sistema de identificação do MATLAB.

Após definir o intervalo dos dados e aplicar a remoção das médias foi possível identificar o modelo do processo secundário no domínio da frequência (s), sendo representado pela função $G2(s)$ determinada conforme Equação (1):

$$G2(s) = \frac{0,21236}{7,1812s + 1} \quad (1)$$

Na Figura 8 é mostrado o gráfico que representa a resposta ao degrau.

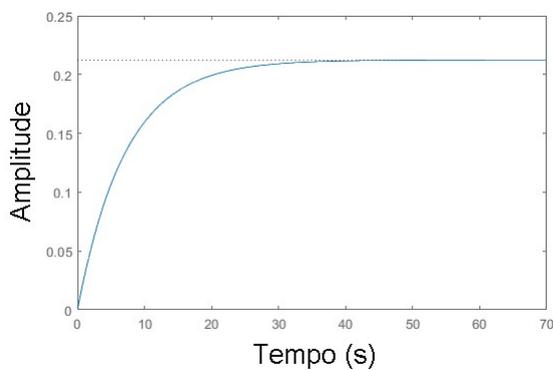


Figura 8. Gráfico de vazão – Resposta ao degrau

Identificado o processo, foi utilizado o SIMULINK (SIMULINK, 2017) no desenvolvimento do controlador secundário $C2(s)$. Aplicando a sintonia foi definido o controlador, dado pela Equação (2):

$$C2(s) = 5,7 + 1,27 \frac{1}{s} \quad (2)$$

Posteriormente, foi efetuado novo teste de resposta ao degrau, este relacionando a vazão com a granulometria obtida.

Foram aplicados diferentes degraus, porém devido a variações no processo, foi reavaliada a aplicação dos testes e feita uma nova aplicação de resposta ao degrau.

Foi aplicado degrau na vazão de água de 3 l/min para 7 l/min.

Na Figura 9 é mostrado o gráfico que representa o degrau aplicado.

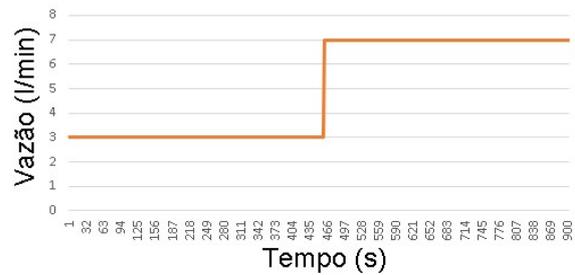


Figura 9. Gráfico da aplicação do degrau de vazão

Na Figura 10 é mostrada a resposta mediante ao degrau aplicado.

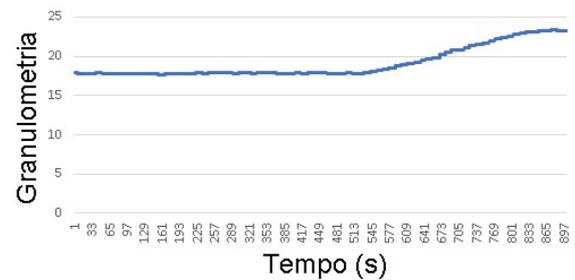


Figura 10. Gráfico de granulometria em relação ao degrau

Observa-se que houve variação e o processo é bem mais lento que o processo secundário (vazão de água).

Com a ferramenta de identificação de sistemas do MATLAB foi obtido o modelo para o processo primário, representado pela função $G1(s)$ conforme Equação (3):

$$G1(s) = \frac{2,207}{8836s^2 + 188s + 1} \quad (3)$$

Na Figura 11 é mostrado o gráfico que representa a resposta ao degrau.

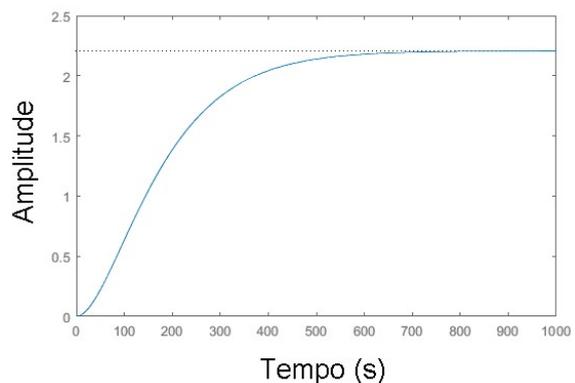


Figura 11. Gráfico de Granulometria – Resposta ao degrau

Com o processo identificado, foi desenvolvido, com o auxílio do SIMULINK, o controlador primário $C1(s)$, conforme Equação (4):

$$C1(s) = 0,895 + 0,004 \frac{1}{s} \quad (4)$$

Com os controles desenvolvidos foi efetuado teste computacional do controlador com a utilização do SIMULINK. Foi aplicado o *set point* de 22% para a faixa granulométrica desejada, ou seja, as pelotas entre 12,5mm e 16 mm devem compor cerca de 22% das pelotas produzidas.

Na Figura 12 é mostrada a resposta obtida.

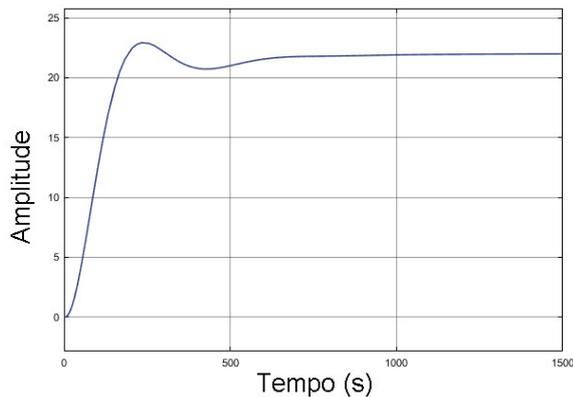


Figura 12. Gráfico de simulação do controlador em cascata

É possível identificar que ocorreu *overshoot* na busca pelo *set point* de 22% e o tempo de estabilização é superior a 700 segundos.

5 Teste Operacional

Após os testes para desenvolvimento e simulação do controle foi aplicado um teste operacional e observado o comportamento do processo.

A faixa granulométrica de 12,5 mm a 16 mm estava em torno de 17%, então foi aplicado o *set point* de 22%.

A Figura 13 mostra a mudança do *set point*.

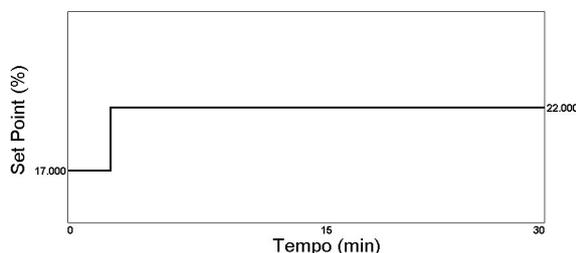


Figura 13. Gráfico de mudança de *set point* – Resposta ao controle

A Figura 14 mostra o comportamento gráfico obtido no processo quando alterado o *set point*.

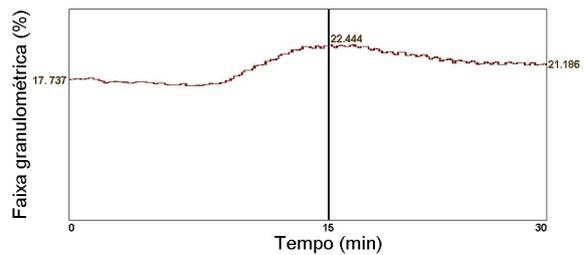


Figura 14. Gráfico de Granulometria – Resposta ao controle

O gráfico mostra um intervalo de 30 minutos, sendo observado um comportamento mais lento do que o em simulação.

Da mesma forma que no teste simulado, ocorreu *overshoot*, chegando a 22,445% a porcentagem de pelotas na faixa granulométrica desejada. Ao final dos 30 minutos a porcentagem estava em 21,186%.

6 Conclusão

Analisando o comportamento obtido do processo em relação ao controle, é possível dizer que a adição de água, no ponto proposto, tende a aumentar a granulometria. No entanto, a variável controlada não apresentou estabilização no *set point* requerido, mesmo contendo integrador, ficando pouco abaixo do desejado.

O erro apresentado em regime permanente pode sugerir que alguma característica física, ou química, do processo esteja influenciando o resultado. Como exemplo, pode ter ocorrido a saturação de umidade, visto que a carga de material é recirculante.

A saturação de umidade pode fazer com que o processo apresente comportamento de diminuição da granulometria, e não o aumento do tamanho das pelotas. Tal característica ocorre devido ao fato da massa de material tornar-se mais liquefeita, o que dificulta a formação de pelotas.

O controle tende a melhorar a homogeneidade das pelotas, porém alguns parâmetros precisam ser reavaliados, como o ponto de saturação de umidade por exemplo. Outro ponto que precisa ser reavaliado é o tempo de estabilização, que foi longo. Portanto, deve-se estudar a possibilidade de atuação mais rápida, analisar outras variáveis que influenciam o processo e identificar possíveis distúrbios.

A planta apresenta grande variação da qualidade de minério devido as diferentes frentes de lavra, portanto, esses elementos devem ser levados em consideração.

Outro ponto que deve ser considerado é a manipulação de todos os pontos de adição de água, pois, mediante diversas circunstâncias, pode-se adicionar água visando outros objetivos, como a criação de novas “sementes” de pelotas. O ponto em questão é o de retorno de pelotas pequenas, e não o interno.

A manipulação da rotação também deve ser adicionada ao controle, e, de acordo com os estudos que

devem ser realizados, unir os controles de rotação e adição de água.

Como o processo possui diversas variáveis, é sugerida a utilização de controle especialista que possibilite a interação de diversas possibilidades de controle.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale, ao Instituto Tecnológico Vale, à Universidade Federal de Ouro Preto, à equipe de automação da pelotização da Mina de Fábrica, e aos operadores, técnicos e engenheiros de produção e processo.

Referências Bibliográficas

- Abouzeid, A. Z. M. and Seddik, A. A. (1981). Effect of Iron Ore Properties on Its Balling Behaviour. *Powder Technology*, 29(2), pp. 233 – 241.
- Chagas, M., Machado, M. L. P., Souza, J. B. C. e Jesus, E. F. (2015). Análise da Influência das Características Granulométricas na Permeabilidade do Leito de Pelotas Através do Método das Redes Neurais Artificiais, *In: 45° Ironmaking, 16° Iron Ore, 3° Agglomeration*. Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração, Rio de Janeiro: ABM, pp. 188 – 196.
- MATLAB: Linguagem de programação (2017). Versão R2017a. Natick, Massachusetts: MathWorks Inc.
- Matos, A. P. (2007). *Influência da Temperatura, Pressão, Produção e Granulometria no Processo de Secagem das Pelotas Cruas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Meyer, K. (1980). *Pelletizing of Iron Ores*. Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf: Springer.
- Nunes, J. E. F. (2004). *Controle de um Processo de Pelotização: Realimentação por Imagem*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Nunes, S. F. (2007). *Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Pietsch, W. (1991). *Size Enlargement by Agglomeration*. New York: John Wiley & Sons.
- Rapp, K. and Nyman, P. (2003). Control of Amplitude in a Surging Balling Drum Circuit, a New Approach to an Old Problem. *Modeling, Identification and Control*, 24, pp. 193 – 203.
- Shinskey, F. G. (1979). *Process Control Systems*. New York: McGraw Hill.
- SIMULINK: Simulation and Model-Based Design (2017). Natick, Massachusetts: MathWorks Inc.
- Thurley, M and Andersson, T. (2008), An Industrial 3D Vision System for Size Measurement of Iron Ore Green Pellets Using Morphological Image Segmentation. *Minerals Engineering*, 21, pp. 405 – 415.
- Vidal, L. C. (2015). *Aplicação Fuzzy X PID: Técnicas de Controle em Ambientes Simulados*. Curitiba: Appris.