

Sistema de Controle usando Máquina de Estado Finita para uma Planta de Beneficiamento de Minério

Washington J. S. Pacífico^{*,**} Moisés T. da Silva^{**}
Santino M. Bitarães^{***} Thomás V. B. Pinto^{**}
Thiago A. M. Euzébio^{**}

* Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil (e-mail: washington.pacifico@vale.com).

** Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, (e-mail: santino.bitaraes@pq.itv.org).

*** Departamento de Pesquisa, Instituto Tecnológico Vale, Brasil, Pesquisador (e-mail: moises.silva@pq.itv.org; thomas.pinto@itv.org; thiago.euzebio@itv.org).

Resumo: Neste artigo é proposto um sistema de controle baseado em Máquinas de Estado Finita (MEF) para aumento da produtividade da planta de beneficiamento de minério de ferro da Vale S.A. em Carajás - PA. Os circuitos de pilha de *pebble*, britagem terciária e peneiramento terciário foram simulados no *software* IDEAS[®] (Andritz Automation), calibrado e validado com informações reais da planta. Os circuitos simulados são usados como ambiente virtual para desenvolvimento e teste das MEF propostas. Os resultados de simulação indicam que o sistema de controle proposto incrementa a taxa de produção entre os processos de peneiramento secundário e a britagem terciária em 13 %. Este valor corresponde a um aumento de produtividade de 3 milhões de toneladas de minério de ferro por ano.

Abstract: This paper proposes a control system based on Finite State Machines (FSM) to increase the productivity of the iron ore processing plant of Vale S.A. in Carajás - PA. The pebble stack, tertiary crushing and tertiary screening circuits are simulated in the software IDEAS, calibrated and validated with real plant data. The simulated circuits are used as a virtual environment for the development and testing of the proposed FSM models. The simulation results indicate that the proposed control system increases the production rate between secondary screening and tertiary crushing processes by 13 %. This value corresponds to an increase in productivity of 3 million tons of iron ore per year.

Keywords: Finite State Machine; Mass Balance; Screening; Crushing.

Palavras-chaves: Máquinas de Estado Finita; Balanço de Massa; Peneiramento; Britagem.

1. INTRODUÇÃO

A busca por ganhos de produtividade e redução de custos dos processos produtivos é o principal objetivo de todas as empresas nos diversos segmentos industriais. No ramo da mineração os mesmos desafios são enfrentados, porém o contexto de alta demanda por minério de ferro e grande competitividade requisita das grandes empresas do mercado um crescente aumento de sua capacidade produtiva, alinhada a uma melhor qualidade do minério produzido e a uma ostensiva redução dos custos de produção.

Diante do contexto de alta competitividade entre grandes empresas do mercado de mineração, a busca por uma maior produtividade é cada vez mais desafiadora. Neste contexto, observa-se que a aplicação de ferramentas de controle e otimização do balanço de massa de processos minerais e maximização de produção, tais como o proposto

em Itävuo et al. (2019), Bhadani et al. (2018), Evertsson (2000) e Júnior et al. (2018) têm sido cada vez mais intensa.

Olivier and Craig (2011) apresentam uma proposta de um sistema de controle preditivo baseado na análise da correlação de características mineralógicas do ROM (*Run of mine*). Além disso, controladores PID são aplicados para determinação em tempo real dos parâmetros de operação do circuito de moagem de minério e maximização da sua performance. Por outro lado, Muller et al. (2010) propôs um sistema de controle com ação integrada e abordagem holística de um circuito de britagem industrial. A análise dos dados operacionais indicou uma diminuição significativa no número de paradas de equipamentos e violações de restrições de processo. Em Hulthén (2010), foi proposto a maximização das taxas de produção através da aplicação de algoritmos baseados em Máquinas de Estado Finita

(MEF) que determinam em tempo real os parâmetros de operação de britadores cônicos. Nesse estudo, focado apenas no processo de britagem, apresentou como resultado um incremento de produção de 3,5 %. Para um sistema de teste de medição de vazão, Jamhour and García (2012) propõe uma solução de automação também utilizando MEF. Trata-se de um sistema usado para obter inferências para medição de vazão que possui inúmeros sensores que coletam sinais de diferentes componentes. A automação realizada permitiu que, após o planejamento do experimento e inserção em um banco de dados das condições desejadas para cada teste, a unidade executasse todos os testes planejados em uma sequência ótima, autônoma e ininterrupta.

Uma máquina de estado é um modelo de comportamento abstrato composto por um número finito de estados. No modelo projetado, cada estado representa uma ação de controle sobre as saídas ou atuadores, ou seja, com base no estado atual e em uma determinada variável de entrada a máquina realiza transições de estado e assim define as saídas (ações). Os blocos de construção básicos de uma máquina de estado são estados e transições. Um estado é uma situação de um sistema que depende das entradas anteriores e causa uma reação nas entradas seguintes (Broy et al., 2005).

O estudo abordado neste artigo tem como foco de atuação a planta de beneficiamento I do Complexo Vale Carajás, localizada no estado do Pará, Brasil. Esta planta de beneficiamento é composta pelos processos de peneiramento secundário e britagem terciária com capacidade de produção de 91 milhões de toneladas por ano, o que corresponde a 20 % de toda a capacidade de produção global da Vale S.A.

Neste artigo é proposto um sistema de controle com ação integrada baseado em MEF para uma planta de beneficiamento de minério. O principal objetivo é maximizar a taxa de produção entre os processos de britagem terciária e peneiramento terciário da planta de beneficiamento de minério de ferro em questão. Esse processo de beneficiamento de minério é simulado usando o software IDEAS[®] (Andritz Automation). A estratégia de controle é implementada no software Matlab[®]. As principais variáveis manipuladas pelo sistema são as taxas dos transportadores de correia, tamanho das partículas de minério e os níveis dos silos dos processos de britagem e peneiramento.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, é apresentada a descrição do processo de beneficiamento de minério de ferro. A descrição do problema é apresentada na Seção 3. Na Seção 4, são apresentadas as limitações operacionais da planta de beneficiamento sob estudo. A estratégia de controle proposta é apresentada na Seção 5. Os resultados e as conclusões são mostrados nas Seções 6 e 7, respectivamente.

2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O fluxograma simplificado do processo de peneiramento secundário, pilha de *pebble*, britagem terciária e peneiramento terciário é apresentado na Figura 1. O processo sob estudo tem seu início no desviador de fluxo (*chute* móvel) que recebe o minério denominado *pebble* (maior

que 19 mm) não-passante pelas peneiras do peneiramento secundário. Este material pode ser destinado para a britagem terciária ou para a pilha de *pebble*, sendo que ambos os processos alimentam o circuito de classificação do peneiramento terciário.

A pilha de *pebble* é um circuito de *by-pass* da britagem terciária. Esta pilha é formada a partir de uma rota alternativa para minério com granulometria maior que 19 mm não-passante no peneiramento secundário. O *pebble* pode ser retomado dessa pilha através dos sete alimentadores vibratórios que alimentam um circuito de correias transportadoras que levam este material até o peneiramento terciário.

A britagem terciária tem por objetivo fragmentar o minério não-passante no peneiramento secundário. A britagem terciária opera com seis linhas independentes, cada uma composta pelos seguintes equipamentos: silos de regularização, alimentadores de correia e britadores cônicos. O produto da britagem terciária alimenta o peneiramento terciário.

O peneiramento terciário é composto por seis linhas de peneiras vibratórias, sendo esse circuito de peneiramento alimentado pelo produto da britagem terciária e, alternativamente, pelo material recuperado da pilha de *pebble*. Cada silo do peneiramento terciário alimenta individualmente cada uma das seis peneiras que estão equipadas com telas para corte em 31,5 mm no primeiro estágio e 19 mm no segundo estágio de classificação. O minério retido no primeiro e no segundo estágio das peneiras é transportado como material recirculante para a britagem terciária. O produto final é o minério passante pelas peneiras correspondentes ao *sinter feed* (material passante pelas peneiras menor que 19 mm) do peneiramento terciário e é transportado até o pátio de produtos da planta de beneficiamento.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O minério de ferro utilizado na planta de beneficiamento sob estudo apresenta elevada umidade. Este minério é composto principalmente de minério hidratado, com umidade média de 8,2 %. Além disso, a alta umidade é influenciada pelo alto índice pluviométrico da região que apresentou precipitação média mensal de 138 mm em 2019¹. Assim, o minério de ferro apresenta elevada coesão. Como consequência surgem os seguintes problemas operacionais:

- Dificuldade no fluxo e transporte do minério;
- Obstrução de calhas e silos de alimentação de equipamentos;
- Redução da eficiência operacional das operações unitárias projetadas para operação a seco;
- Menor eficiência das peneiras vibratórias, devido a obstrução de suas telas com retenção de finos (menor que 19 mm) junto ao minério não-passante.

Devido às características do minério de ferro com alta umidade, o processo de peneiramento secundário tem a sua eficiência operacional comprometida (Chaves and Peres, 2012). Em particular, ocorre a retenção de finos junto ao minério não-passante pelas peneiras com tamanho de

¹ Fonte: <https://www.cptec.inpe.br>

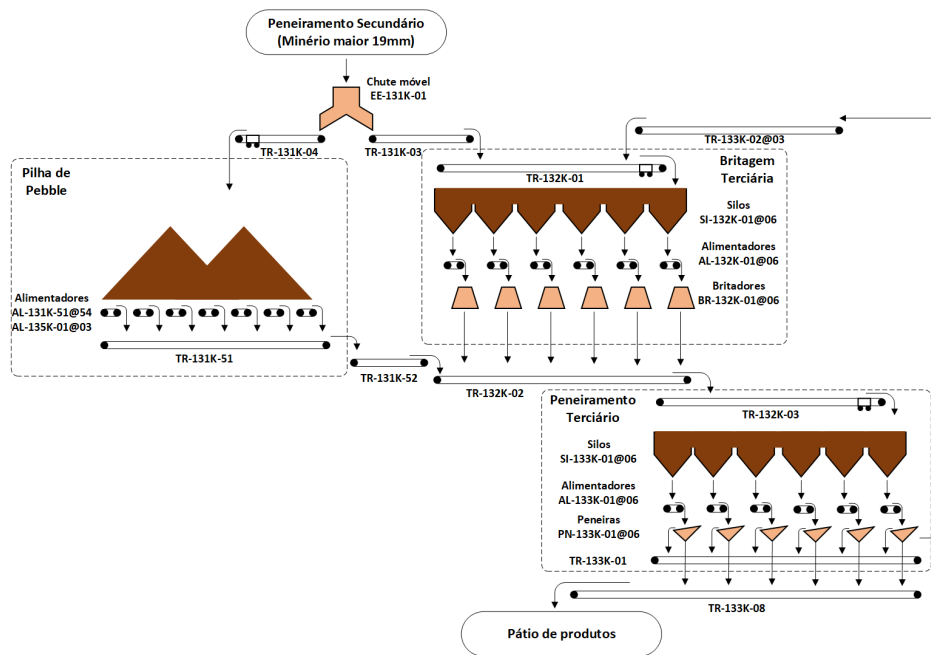


Figura 1. Fluxograma do processo de britagem e classificação de minério da Vale S.A. em Carajás - PA.

partícula superior a 19 mm. Com a retenção de finos junto com minério não-passante das peneiras, esse material não pode ser destinado continuamente para os britadores cônicos, pois podem provocar o travamento e até danificar os britadores. Dessa forma, é realizado o redirecionamento deste material para a pilha de *pebble* (circuito de *by pass* da britagem terciária). Entretanto, a recuperação do minério armazenado na pilha de *pebble*, composta por *pebble* e finos, tem como consequência final o aumento da carga recirculante para o circuito de britagem terciária, o que compromete o fluxo de produção principal entre os circuitos de peneiramento secundário e britagem terciária, chegando a interromper a produção de toda a planta de beneficiamento.

A estratégia de controle proposta visa contornar o problema descrito acima a partir da determinação da taxa de recuperação do minério da pilha de *pebble* e do fluxo de produção. Para isso, observa-se momentos de alívio de capacidade dos transportadores de correia da britagem terciária até a alimentação do peneiramento terciário.

4. LIMITAÇÕES DA PLANTA DE BENEFICIAMENTO

A planta de beneficiamento sob estudo apresenta limitações operacionais que comprometem sua capacidade produtiva. Além disso, tais limitações dificultam a implementação de algumas estratégias de controle do processo. As principais limitações são:

- O setpoint da taxa de retomada de material da pilha de *pebble* através dos alimentadores vibratórios é configurado manualmente pelos operadores da planta. A partir dos dados históricos, apresentados na Figura 2, observa-se a possibilidade de aumento das taxas das correias transportadoras do circuito que transporta o minério da pilha de *pebble* e britagem terciária para o peneiramento terciário, visto que em vários

momentos nenhum material é retomado da pilha de *pebble*. Historicamente, as correias transportadoras operaram com taxas médias 44 % inferiores à taxa nominal desses transportadores (3600 t/h);

- O acionamento do desviador de fluxo para a britagem terciária ou para a pilha de *pebble* é feita de maneira empírica e manual, pois a planta atual não conta com um analisador de granulometria (instrumento usado para estimar o tamanho das partículas de minério de ferro);
- Ambos os transportadores que alimentam a britagem terciária e o peneiramento terciário, possuem interferências mecânicas que impedem seu deslocamento homogêneo pelos silos, o que compromete a capacidade de produção e eficiência operacional;
- Não é possível alimentar diretamente o silo de número 6 da britagem terciária e do peneiramento terciário, sendo que esses silos são alimentados apenas a partir do transbordo de material dos silos vizinhos. Durante a simulação da planta de beneficiamento considera-se apenas os silos 1 a 5.

5. ESTRATÉGIA DE CONTROLE PROPOSTA

O objetivo primário do sistema de controle proposto é maximizar o fluxo principal de produção entre o peneiramento secundário e a britagem terciária. Os objetivos secundários do sistema são: Aumentar a taxa de recuperação do minério armazenado na pilha de *pebble* e automatizar o desviador de fluxo, minimizando o volume médio da pilha de *pebble*.

Para tanto, é proposto um sistema de controle baseado em Máquinas de Estados Finitos (MEF) em uma estratégia de controle em cascata (Wade, 2004) para determinação do setpoint do controlador PID que define a taxa dos alimentadores que recuperam o minério estocado na pilha de *pebble*.

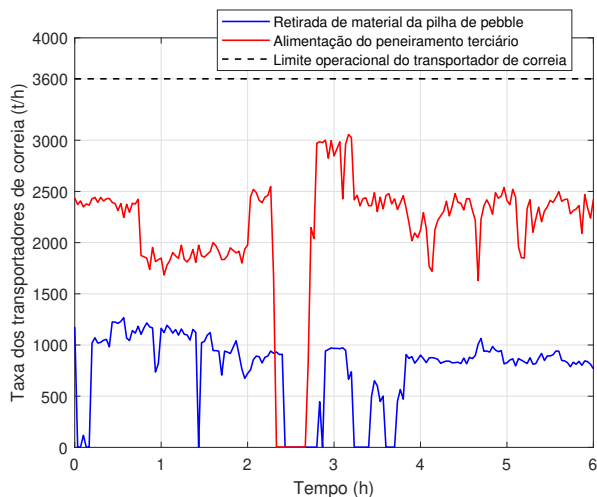


Figura 2. Gráfico da taxa dos transportadores de correia de retomada de minério da pilha de *pebble* e alimentação do peneiramento terciário.

Neste trabalho, foram desenvolvidos duas estratégias de controle baseadas em MEF que foram implementadas no software Simulink[®]. Os elementos de cada MEF são apresentados na Figura 3 e descritos a seguir.

5.1 Maximização da taxa de alimentação do peneiramento terciário

O objetivo deste sistema de controle através da MEF é maximizar a taxa de alimentação do peneiramento terciário, a partir da definição automática do *setpoint* da taxa de retomada do minério estocado na pilha de *pebble*. Atualmente, este *setpoint* é configurado manualmente pelo operador da planta.

A estratégia de controle proposta também busca maximizar a taxa de recuperação. Para isso, são observados momentos de alívio de capacidade dos transportadores de correia que levam o minério da pilha de *pebble* e britagem terciária para alimentação do peneiramento terciário. A seguir são listadas as variáveis de entrada e saída da MEF, cuja a representação é apresentada na Figura 4:

- Entradas:
 - Taxa da correia transportadora do circuito que transporta o minério da pilha de *pebble* e britagem terciária, que corresponde à taxa de alimentação do peneiramento terciário (t/h);
 - Nível médio dos silos do peneiramento terciário.
- Saída:
 - Setpoint da taxa de retomada do minério estocado na pilha de *pebble*.

5.2 Controle automático do fluxo de produção

O objetivo deste segundo sistema de controle por MEF é automatizar a decisão sobre o fluxo de minério não-passante do peneiramento secundário para a britagem terciária ou para a pilha de *pebble*. Para isso, é proposta o uso da curva de distribuição de tamanho de partícula. Na simulação realizada neste artigo considera-se o uso de um analisador virtual de granulometria. É importante

destacar que essa curva de distribuição do tamanho de partícula foi obtida a partir do histórico de produção da planta de beneficiamento.

A seguir são listadas as variáveis de entrada e saída para este sistema de controle baseado em MEF, cuja a representação é apresentada na Figura 5.

- Entradas:
 - Taxa do transportador de correia do circuito de recirculação que transporta o minério não-passante do peneiramento terciário para a britagem terciária (t/h);
 - Nível médio dos silos da britagem terciária;
 - Curva de distribuição do tamanho de partículas (Analisador de granulometria virtual).
- Saída:
 - Posição do desviador de fluxo para a britagem terciária ou para pilha de *pebble*.

6. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a estratégia de controle proposta baseada na MEF para a planta de beneficiamento de minério de ferro da Vale S.A. em Carajás - PA.

Para avaliação da estratégia de controle foram utilizados dados de produção da planta de beneficiamento coletados por meio do sistema PIMS (*Plant Information Management System* - AspenTech Infoplus.21[®]). Os dados de produção referem-se a um período contínuo de 6 horas de operação da planta no dia 15/10/2019 no qual a operação ocorreu na sua capacidade nominal, sem a ocorrência de problemas representativos do ponto de vista de manutenção, como longas paradas de equipamentos por falha. Já os dados operacionais do dia 28/10/2020 são classificados pela equipe de operação como um dia de baixa produtividade devido aos problemas de alta umidade do material.

Foram simulados seis cenários de acordo com curva de granulometria do minério não-passante do peneiramento secundário, esses dados operacionais são definidos como entrada do simulador da planta de beneficiamento. Os seguintes cenários são considerados:

- Cenário 1: 100 % do tempo com material não-passante (material grosso);
- Cenário 2: 80 % do tempo com material não-passante;
- Cenário 3: 60 % do tempo com material não-passante;
- Cenário 4: 40 % do tempo com material não-passante;
- Cenário 5: 20 % do tempo com material não-passante;
- Cenário 6: 100 % do tempo com material fino (material fino).

Um simulador da planta beneficiamento foi desenvolvido utilizando o software IDEAS[®] e configurado utilizando os parâmetros de processo e capacidades de cada um dos equipamentos que compõe os processos de britagem terciária, pilha de *pebble* e peneiramento terciário com o objetivo de validar as estratégias de controle propostas. O sistema de controle baseado na MEF foi integrado ao simulador da planta de beneficiamento via um servidor OPC (*OLE for Process Control*), responsável pela escrita e leitura das variáveis de controle, conforme diagrama

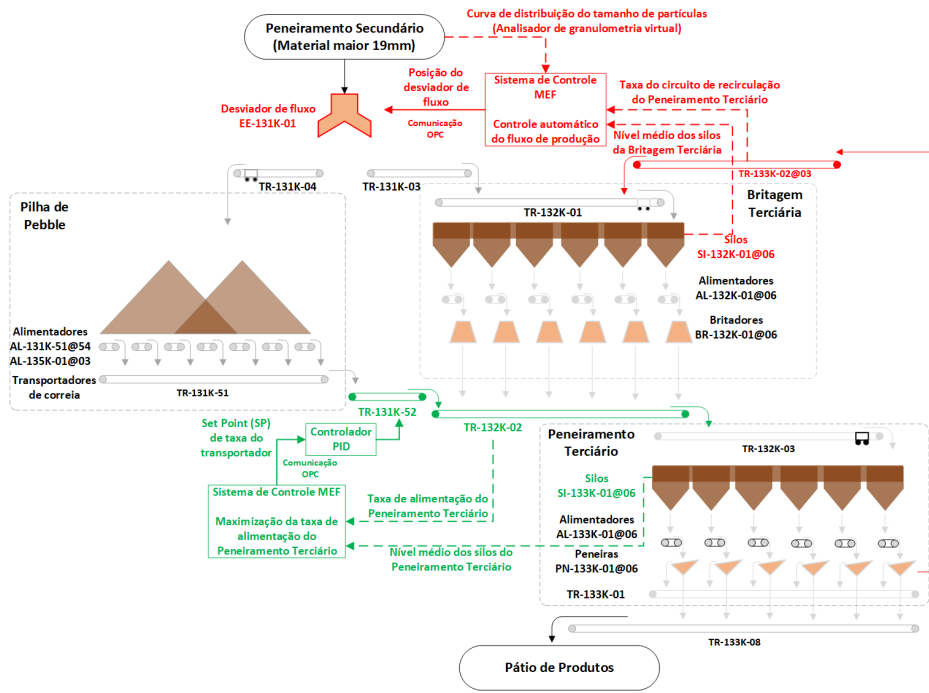


Figura 3. Representação dos sistemas de controle MEF propostos e integração com a planta de beneficiamento de minério.

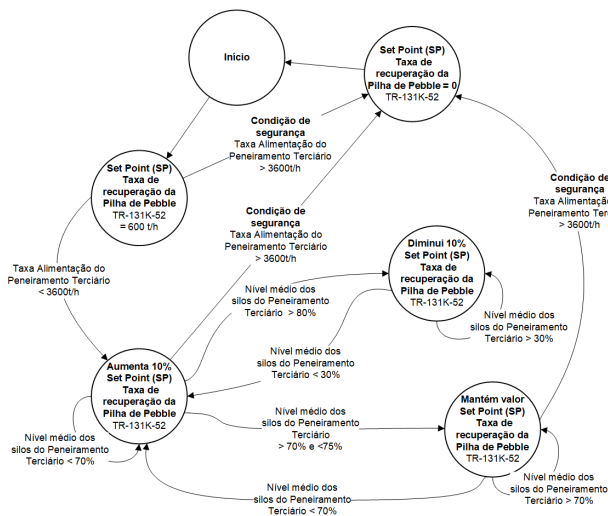


Figura 4. Representação da máquina de estado para maximização da taxa de alimentação do peneiramento terciário.

esquemático da arquitetura de simulação apresentado na Figura 6.

A Tabela 1 sumariza os resultados obtidos com a estratégia de controle proposta para todos os cenários. Os resultados obtidos com a abordagem proposta são comparados com os resultados operacionais obtidos com a definição manual dos operadores para o *setpoint* da taxa de retomada do minério estocado na pilha de *pebble* e definição da posição do desviador de fluxo EE-131K-01 para britagem terciária ou pilha de *pebble*, que apresentam uma taxa média de alimentação do peneiramento terciário de 2330t/h, conforme dados de operação coletados via PIMS da Vale (data: 15/10/2019).

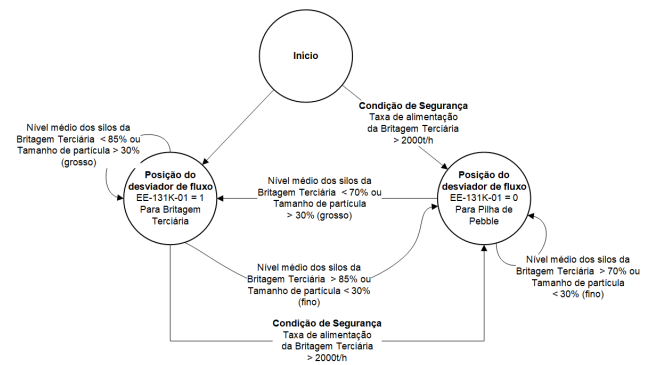


Figura 5. Representação da máquina de estado para controle automático do fluxo de produção.

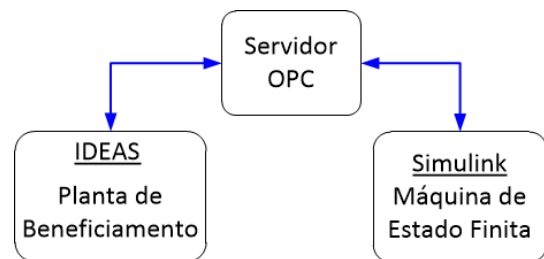


Figura 6. Diagrama esquemático da arquitetura de simulação.

Conforme apresentado na Figura 7, verifica-se que a ação integrada dos sistemas de controle baseados em MEF alcançou o objetivo de maximizar a taxa de alimentação do peneiramento terciário (circuito prioritário de produção), apresentando resultados consistentes em todos os cenários de simulação. Os resultados sinalizam para um aumento de cerca 13 % da taxa média de alimentação do peneiramento terciário quando comparada com a taxa média

Tabela 1. Resultados dos cenários simulados.

Cenário	Taxa de alimentação do Peneiramento Terciário (t/h)	Aumento médio de taxa de alimentação do Peneiramento Terciário (%)	Nível médio dos silos do Peneiramento Terciário (%)	Nível médio dos silos da Britagem Terciária (%)
1	2641,48	13,37	73,05	72,29
2	2642,81	13,43	72,76	72,33
3	2635,40	13,11	71,97	72,30
4	2641,76	13,38	72,70	72,02
5	2642,19	13,40	73,17	72,21
6	2642,78	13,43	72,93	72,14

alcançada na operação do dia 15/10/2019 sem a ação dos controladores.

Além deste resultado com ganho direto no aumento de produção da planta de beneficiamento correspondente a cerca de 3 milhões de toneladas por ano (projeção anual), os resultados das simulações demonstram que a estratégia de controle proposta foi capaz de estabelecer uma taxa de recuperação com menos oscilações, sem a necessidade de interrupção da produção e paradas de equipamentos devido a alarmes de nível alto dos silos da britagem terciária e peneiramento terciário.

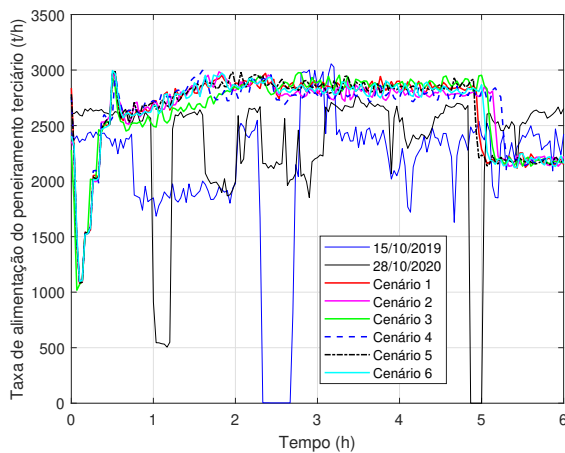


Figura 7. Taxa de alimentação do peneiramento terciário.

A partir da análise e comparação entre os 6 cenários de simulação é possível concluir que:

- O controlador MEF alcançou o objetivo de maximizar o tempo de operação no qual o fluxo do material foi direcionado para a britagem terciária, que representa o circuito prioritário de operação e que contribui para o aumento de produção da planta de beneficiamento.
- Mesmo nos cenários 5 e 6, com maior fluxo de material fino, a ação do controlador MEF possibilitou a alimentação do britagem terciária, o que contribui para o aumento da taxa de alimentação do peneiramento terciário. Em condições similares de operação, os dados históricos de produção demonstram que a decisão dos operadores da planta seria de direcionar o material de granulometria fina diretamente para a pilha de *pebble*.

A partir da análise dos dados históricos de produção, observa-se valores elevados da taxa de retomada de minério da pilha de *pebble*, mas com uma grande intermitência de parada e retomada de produção.

Do ponto de vista operacional, esta intermitência de produção acarreta em perda de eficiência operacional. Observa-se na Figura 8 que a ação do sistema de controle baseado em MEF possibilitou a manutenção de uma taxa de retomada de material da pilha de *pebble* no valor médio de 540 t/h, similar a média da operação sem ação do sistema de controle, porém a abordagem de controle proposta não apresentou grandes oscilações e intermitências na parada dos equipamentos associados.

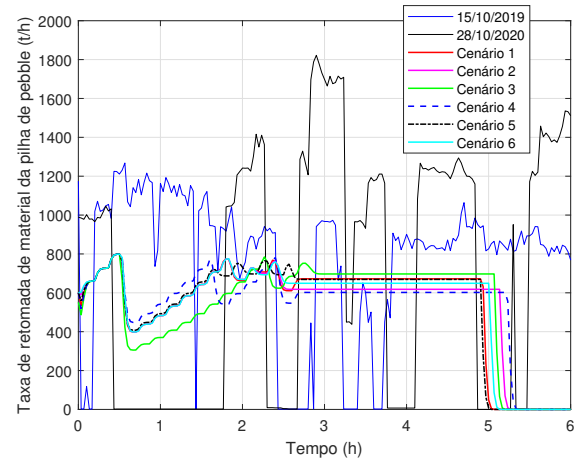


Figura 8. Taxa de retomada de minério da pilha de *pebble*.

Durante as simulações realizadas, observa-se que a atuação integrada dos sistemas de controle baseada em MEF possibilitou a manutenção da operação da britagem terciária e do peneiramento terciário com nível médio acima de 70 %, conforme apresentado nas Figuras 9 e 10.

Como vantagem operacional, a manutenção dos níveis dos silos neste percentual médio possibilita uma maior capacidade de alcançar uma estratégia operacional de maximização da produção, pois nos níveis dos silos não alcançaram níveis emergenciais (alarmes de nível alto) constantemente. Ao atingir níveis emergenciais pode-se provocar várias paradas de operação da planta de beneficiamento de minério sem a ação dos controladores MEF.

O problema de diversas paradas operacionais foi minimizado pela ação dos controladores MEF, pois a partir dos resultados de simulação, observa-se apenas um ponto correspondente a uma parada operacional devido ao nível alto dos silos do peneiramento terciário que ocorre após 5 horas de operação. Essa parada provocou a interrupção da retomada de material da pilha de *pebble* (ver Figura 8) e consequente redução da taxa de alimentação do peneiramento terciário (ver Figura 7).

7. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma estratégia de controle baseada em Máquina de Estado Finita para um processo de beneficiamento de minério de ferro. A partir dos resultados obtidos através da simulação dinâmica do processo, observa-se que a estratégia proposta atingiu o objetivo de maximizar a taxa de alimentação do peneiramento terciário (circuito prioritário de produção). Além disso, não ocorreram paradas de emergência da alimentação dos silos devido a alarmes de nível alto. Os resultados da simulação

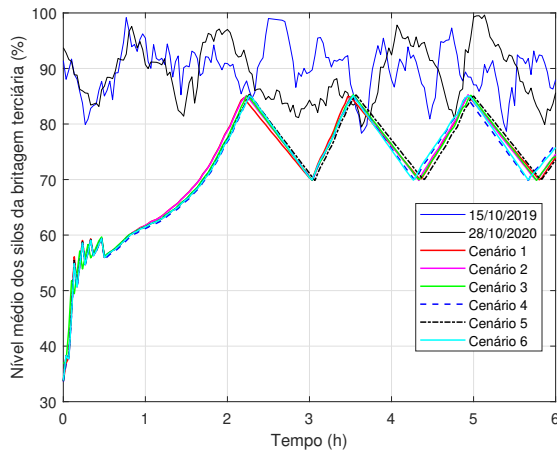


Figura 9. Nível médio dos silos da britagem terciária.

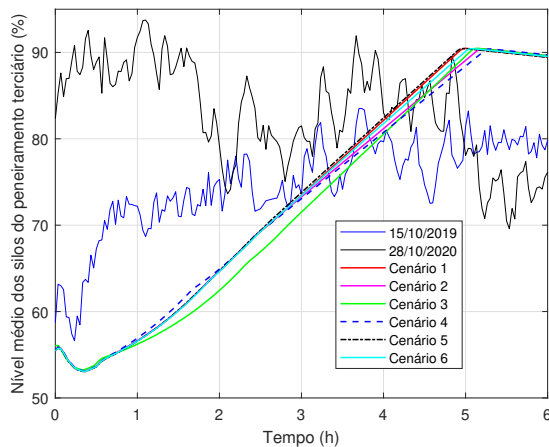


Figura 10. Nível médio dos silos do peneiramento terciário.

demonstram que o investimento na aquisição e instalação de um analisador de granulometria para classificação do minério não-passante pelo peneiramento secundário possibilitaria a determinação automática do fluxo do material. Dessa forma, contribuiria para o sucesso da estratégia de maximização da taxa de alimentação do peneiramento terciário e conseqüentemente para o aumento de produção da planta de beneficiamento. Como trabalho futuro pretendemos implementar os algoritmos da MEF no controlador lógico programável da planta sob estudo.

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), números 402759/2018-4 e 444425/2018-7; do Instituto Tecnológico Vale (ITV); da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

REFERÊNCIAS

Bhadani, K., Asbjörnsson, G., Hulthén, E., and Evertsson, M. (2018). Application of multi-disciplinary optimi-

- zation architectures in mineral processing simulations. *Minerals Engineering*, 128, 27–35.
- Broy, M., Jonsson, B., Katoen, J.P., Leucker, M., and Pretschner, A. (2005). Model-based testing of reactive systems. In *Volume 3472 of Springer LNCS*. Springer.
- Chaves, A. and Peres, A. (2012). *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem*. Oficina de textos, São Paulo, SP.
- Evertsson, C.M. (2000). *Cone Crusher Performance*. Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Hulthén, E. (2010). *Real-time optimization of cone crushers*. Master's thesis, Chalmers University of Technology.
- Itävuo, P., Hulthén, E., Yahyaei, M., and Vilkkö, M. (2019). Mass balance control of crushing circuits. *Minerals Engineering*, 135, 37–47.
- Jamhour, A. and García, C. (2012). Automation of industrial serial processes based on finite state machines. *Procedia Engineering*, 42, 186–196.
- Júnior, M.P., Reis, L.A., and Euzébio, T. (2018). Estratégias de controle avançado aplicadas a um simulador de circuito de moagem. *19º Simpósio de Mineração*.
- Muller, D., De Villiers, P., and Humphries, G. (2010). A holistic approach to control and optimisation of an industrial crushing circuit. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(9), 142–146.
- Olivier, L.E. and Craig, I.K. (2011). Parameter mismatch detection in a run-of-mine ore milling circuit under model predictive control. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 9929–9934.
- Wade, H.L. (2004). *Basic and advanced regulatory control: System design and application*. International Society of Automation.