

# OTIMIZAÇÃO DE RECUPERADORAS DE RODAS DE CAÇAMBAS<sup>1</sup>

Bruno Eduardo Lopes<sup>2</sup>

## Resumo

O presente trabalho tem por objetivo otimizar o fluxo de recuperação durante operação remota utilizando da implementação de algoritmos de controle do tipo PID, técnicas de identificação e um novo método de aprendizagem por reforço, aqui chamado de Método de Aprendizagem por Reforço por Diferença e Método de Aprendizagem por Reforço Proporcional. O resultado do trabalho foi um aumento de produtividade, com a redução na variabilidade do fluxo e na quantidade de ocorrências de sobrefluxo. Para evitar a ocorrência de sobrefluxo e melhorar ainda mais o controle do fluxo é sugerido neste trabalho a utilização de instrumentação que permita a implantação de um controle antecipatório.

**Palavras-chave:** Controle PID; Controle preditivo; Recuperadora de minério de ferro; Identificação de sistemas.

## OPTIMIZATION OF BUCKET WHEEL RECLAIMERS

### Abstract

The purpose of the this paper is to demonstrate the optimization of the flow for the iron ore reclaiming process by reclaimers over rails using implementation of PID control algorithms, identification techniques, Predictive Control and a new effort-based learning method herein called reinforcement by difference learning method and proportional reinforcement learning method. The outcome was an increase of productivity, with reduction of the flow variability and on the amount of overflow occurrences

**Key words:** Bucket wheel reclaimers; PID control; Predictive control; System identification.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 16º Seminário de Automação e TI Industrial, 18 a 21 de setembro de 2012, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Mestrado em Eng. Industrial Elétrica. Engenheiro de automação sênior. VALE, São Luis, MA. E-mail: bruno.eduardo@vale.com

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se controlar sistemas e processos físicos existe desde tempos remotos. O controle manual, primeira forma de controle utilizada pelo homem, e ainda presente em muitos processos, apresenta a necessidade de um operador humano que deve conhecer o sistema e ter razoável experiência e habilidade. Com o crescente aumento no grau de sofisticação das atividades humanas surgiu o interesse e a necessidade de automatizar ou semi-automatizar determinados processos, isso foi possível a partir do desenvolvimento científico e tecnológico, que dentre os diversos conhecimentos nos trouxe as teorias clássicas de controle. Contudo, com o avanço da tecnologia, os sistemas e processos ficaram ainda mais complexos, tornando ineficaz, ou até mesmo impossíveis, a utilização dos controladores convencionais obtidos a partir da teoria clássica. Isso desencadeou uma busca por novos métodos e estratégias de controle tais como: controle multivariável, controle adaptativo, controle preditivo, e sistemas de controle inteligente

Este trabalho demonstra a aplicação de técnicas de identificação e de controle de processos nas recuperadoras e empilhadeiras / recuperadora sobre trilhos localizadas no Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM).

O Terminal Portuário de Ponta da Madeira, localizado no Brasil em São Luís-MA, pertencente à VALE é composto, atualmente, por quatro viradores de vagões com capacidade nominal de 8.000 toneladas por hora cada, dez pátios de estocagem de minério, correias transportadoras e dez máquinas de pátio divididas em: três empilhadeiras, três recuperadoras, quatro empilhadeiras / recuperadoras e quatro carregadores de navio, usados para carregar o minério de ferro.



**Figura 1** – Empilhadeira-Recuperadora instalada no TMPM.

## 2 MODOS DE OPERAÇÃO PARA RECUPERAÇÃO

As recuperadoras instaladas no TMPM podem utilizar de 3 (três) modos de operação para controle no processo de recuperação:

- local;
- manual;
- semi-automático;

O trabalho de otimização foi realizado para melhorar a performance apenas do modo de operação Semi-Automático.

## 2.1 Modo Local

Esse terá a função de manutenção ou testes e será executado através da ação dos mantenedores nas botoeiras de comandos situadas próximas aos equipamentos e respeitando os intertravamentos de segurança, não sendo possível nesse modo qualquer processo produtivo. Os equipamentos serão comandados via CLP.

## 2.2 Modo Manual

Para que se caracterize o modo MANUAL, basta que se tenha selecionado na IHM (Interface Homem Máquina) ou na EOS (Estação de Operação e Supervisão) o modo MANUAL. A sinalização será feita através de MANUAL SALA DE CONTROLE ou MANUAL CABINE escrito na tela de operação.

## 2.2 Modo Semi-Automático

Neste modo operacional, o operador estabelece os parâmetros do processo, tais como balizas inicial e final, set-point para a taxa de recuperação e o tempo ou distância para avanço e os ângulos de reversão do giro da lança.

Inicialmente, através da manete de giro, comanda-se o movimento e "marcam-se" os pontos de reversão. Os pontos marcados serão memorizados e após essa marcação, toda vez que o ângulo de giro alcançar os pontos memorizados, ocorre a reversão desse movimento. Através da console de operação é possível resetar as informações do ponto de reversão anteriormente definido, permitindo um novo preset para ajuste do ponto de reversão.

Neste modo, os movimentos de recuo e descida da lança para mudança de bancada de recuperação são realizados de forma manual, sendo necessário reiniciar o processo de recuperação, marcando novos pontos de reversão do giro da lança.

A velocidade de giro é controlada através de um malha de controle PID e o tempo para o passo de translação é determinada pelo operador, podendo ser ajustada automaticamente por uma lógica desenvolvida no CLP.

A fim de se preservar a medição de vazão, sem a interferência do impacto do material recuperado sobre o transportador da lança, a balança é sempre montada a uma distância razoável da roda de caçamba, geralmente no ponto médio do transportador da lança. Esta distância da balança com a Roda de Caçamba ocasiona um tempo de atraso<sup>(1-4)</sup> médio de 10 segundos e por este motivo não se utiliza a vazão medida pela balança como variável do processo.

## 3 PADRÃO DE LÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO DO FLUXO

O padrão de lógica para otimização do fluxo, existente no TMPM, foi desenvolvido com o objetivo de controle das seguintes variáveis:

- velocidade do giro; e
- passo de translação.

## 3.1 Controle da Velocidade do Giro

### 3.1.1 Modelagem matemática dos dados

Em função do elevado tempo de atraso da roda de caçamba em relação a balança do processo conforme Figura 2, que impossibilitaria a implantação de um controle do fluxo, foi necessário desenvolver um modelo matemático para estimar o fluxo de recuperação e eliminar este tempo de atraso.

Inicialmente foi estudada a correlação do fluxo com as seguintes variáveis de processo:

- corrente ou pressão da roda de caçamba;
- corrente do motor de giro; e
- velocidade do giro.

Foi verificada a existência de uma alta correlação entre o fluxo de recuperação em relação a corrente ou pressão da rodada caçamba e em relação a velocidade do giro, e baixa correlação em relação a corrente do Giro. Para este trabalho, verificou-se a necessidade de utilizar apenas a corrente ou pressão da roda de caçamba para estimação do fluxo de recuperação.

Para representar matematicamente o fluxo estimado de recuperação foi utilizado o modelo linear ARX, cujos conceitos estão bem demonstrados em Aguirre<sup>(5)</sup> e o Método de Mínimos Quadrados Estendido<sup>(6)</sup> para estimação dos parâmetros. Para determinação da ordem do modelo foi utilizado o Método de Análise dos Autovalores para modelos lineares, criado por Lopes et al.<sup>(7)</sup>

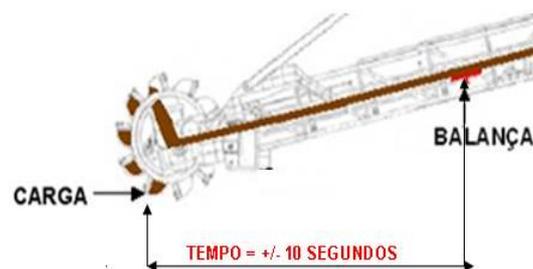


Figura 2 – Tempo de atraso entre roda de caçamba e balança.

Para fazer a estimação dos parâmetros do modelo ARX foi utilizado os dados demonstrados nas Figuras 3 (Corrente) e 4 (fluxo).

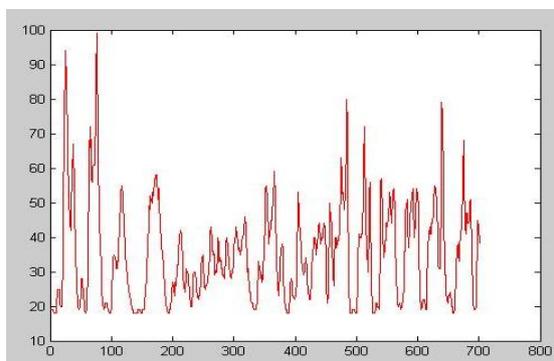


Figura 3 – Dados de corrente utilizados para estimação dos parâmetros do modelo

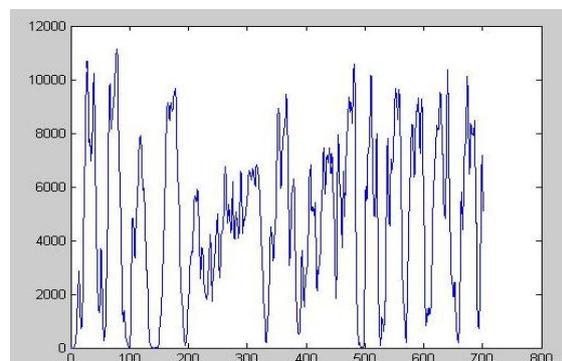
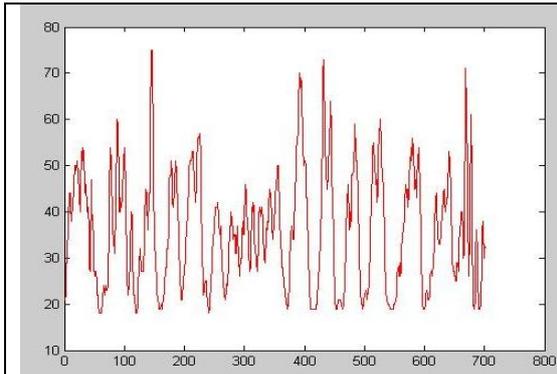


Figura 4 – Dados de Fluxo utilizados para estimação dos parâmetros do modelo

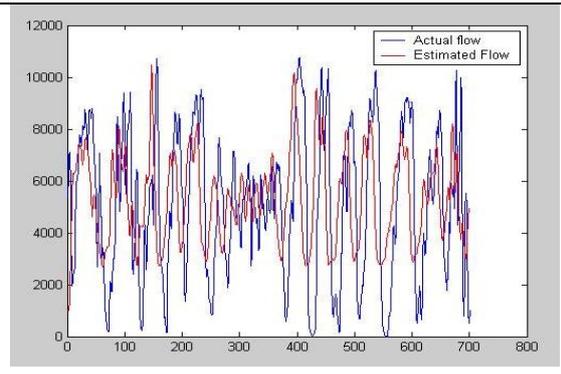
O modelo de 3º ordem obtido foi:

$$y(k) = 0,09y(k-3) - 0,76y(k-2) + 1,546y(k-1) + 12,11u(k-2) - 36,48u(k-1) + 43,238u(k) \quad (1)$$

Para validação do modelo 1 foi utilizado os dados de corrente demonstrados na Figura 5. O fluxo real e o fluxo estimado para os dados de corrente demonstrados na figura 5 são apresentados na Figura 6. Pode-se perceber que o modelo estimado possui uma boa representação dos dados reais



**Figura 5** – Dados de corrente para validação de modelo 1



**Figura 6** - Comparativo do fluxo real com o estimado

### 3.1.2 Aprendizagem por reforço

Devido a uma mudança no comportamento da corrente da Roda de Caçamba da recuperadora ao longo do tempo, o modelo 1 passou a não estimar corretamente o fluxo. O problema foi percebido alguns dias após a implantação deste modelo no CLP.

Para resolver este problema foi criado neste trabalho dois novos métodos de aprendizagem por reforço chamado Método de Aprendizagem por Reforço por Diferença e Método de Aprendizagem por Reforço Proporcional. O procedimento para utilização dos métodos são:

- Analise graficamente o comportamento dos dados reais em relação aos dados estimados. Divida o gráfico em duas ou mais áreas, sendo que estas áreas deverão ser divididas de acordo com uma mudança de comportamento na diferença observada entre os dados reais e os dados estimados. Neste trabalho foi dividido em 3 áreas: Área 1: Fluxo < 4000 t/h; Área 2: Fluxo >= 4000 t/h e <=8000 t/h; Área 3: Fluxo >8000 t/h.
- Caso a diferença observada entre os dados reais e os dados estimados se tratarem de um erro estacionário opte em utilizar o Método de Aprendizagem por Reforço por Diferença. Caso seja um erro de proporcionalidade utilize do Método de Aprendizagem por Reforço Proporcional. Neste trabalho foi utilizado Método de Aprendizagem por Reforço por Diferença
- Caso se opte na utilização do Método de Aprendizagem por Reforço por Diferença compare os dados estimados atrasados (de acordo com o valor do tempo de atraso) com os dados reais, determine a diferença entre estes dados (Dados reais - Dados Estimados atrasado) e some esta diferença aos dados estimados. Esta diferença deverá ser

calculada e somada independente para cada área determinada no item a.

- Caso se opte na utilização do Método de Aprendizagem por Reforço Proporcional compare os dados estimados atrasados (de acordo com o valor do tempo de atraso) com os dados reais, faça uma divisão entre estes dados (Dados reais / Dados Estimados atrasado) e multiplique o valor obtido aos dados estimados. Esta divisão deverá ser calculada independente para cada área determinada no item a.
- O cálculo do erro entre os dados reais e os dados estimados deverá ser realizado a cada  $N$  segundos, sendo que o valor  $N$  será determinado de acordo com o problema a ser resolvido. Neste trabalho foi utilizado  $N=10$  segundos.

O modelo 1 e o método de aprendizagem por reforço foi configurado no CLP da recuperadora e através da Figura 7, dados reais extraído do PIMS, pode se verificar que o fluxo estimado possui uma boa representação do fluxo real.



Figura 7 – Comparativo do fluxo estimado com o real

Com a utilização do método de aprendizagem por reforço por diferença nas recuperadoras e Empilhadeiras-Recuperadoras do TPM foi possível garantir a precisão do fluxo estimado independente da diferença do comportamento da corrente ou pressão da roda de caçamba ao longo do tempo. Esta precisão pode ser verificado nas Figuras 8, 9 e 10 que durante vários meses, apresentou um fluxo estimado (azul) bem próximo do fluxo real (vermelho) mantendo o valor do tempo de atraso.

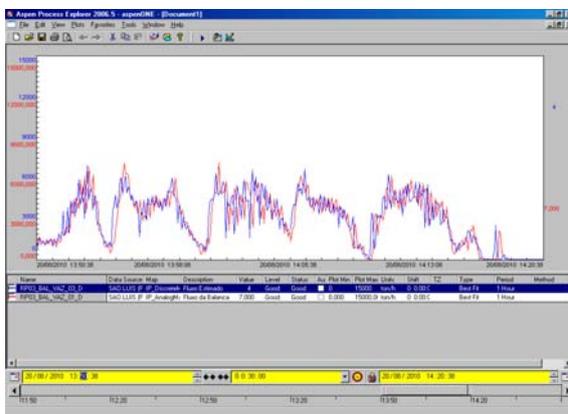


Figura 8 – Comparativo do fluxo real com o fluxo estimado no dia 20/08/2010

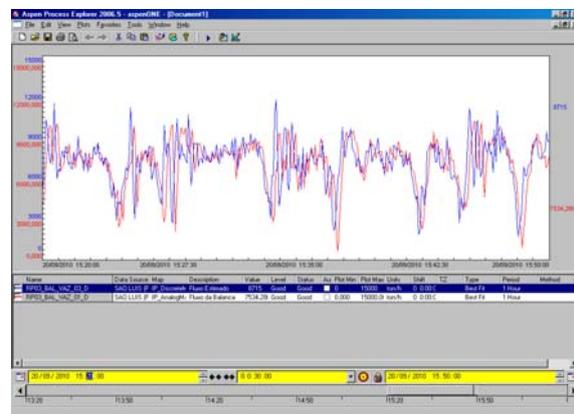


Figura 9 – Comparativo do fluxo real com o fluxo estimado no dia 20/09/2010

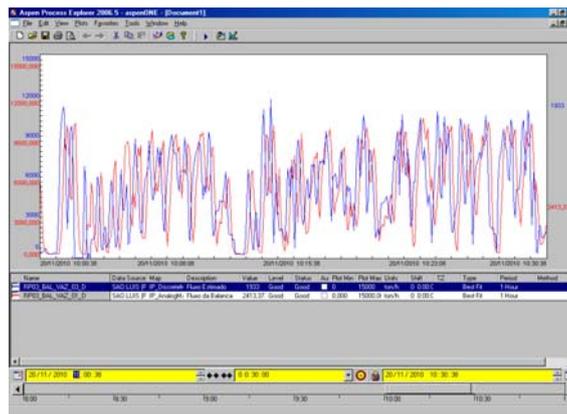


Figura 10 – Comparativo do fluxo real com o fluxo estimado no dia 20/11/2010

### 3.1.3 Controle PID

A velocidade de giro, interfere na intensidade de penetração da roda de caçambas na pilha, é definida através de uma malha de controle PID que tem como set-point (SP) a taxa (vazão) de recuperação desejada, e como variáveis de processo (PV) a vazão estimada através da corrente da roda de caçamba. A variável controlada (CV) é a velocidade de giro da lança. Esta malha de controle pode ser verificada na Figura 11.

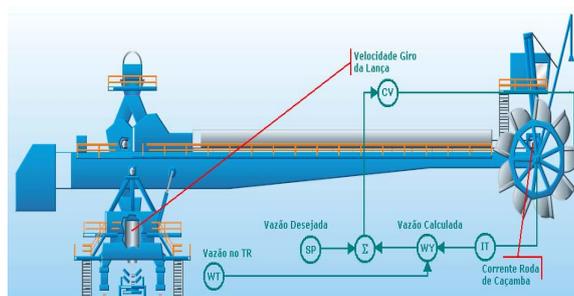


Figura 11- Malha de controle do Fluxo

Como o método de sintonia do PID não era objeto de estudo para este trabalho, foi utilizado um método de sintonia prático e os parâmetros encontrados foram:  $k_p$  Ganho= 0.3;  $k_i$  Ganho = 0.2; Período de Amostragem = 100 milissegundos

O PID e os parâmetros aqui encontrados, foram implantados no CLP da recuperadora e o resultado é demonstrado na Figura 12, na qual operador estabeleceu como SetPoint 8000 ton/h e o controlador PID ajustou a velocidade do giro até que o fluxo desejado fosse atingido. Para este PID foi configurado um Banda Morta de 500 ton/h.

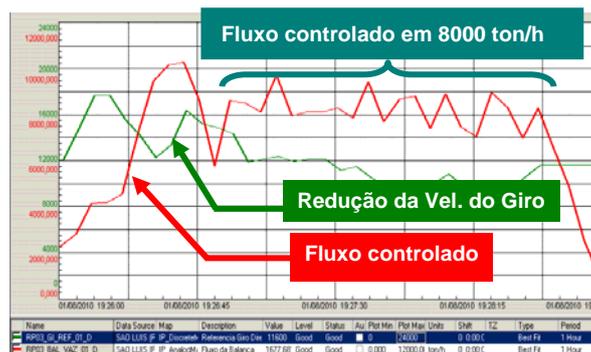


Figura 12 – Fluxo controlado em 8000 ton/h (Dados reais extraídos do PIMS)

## 3.2 Passo de Translação

O passo de translação inicial é definido manualmente pelo operador e individualmente antes de cada direção do giro (horário e Anti-horário). Seu ajuste é feito em função do tempo ou distância para translação em segundos, ou centímetros

Caso o operador opte pelo controle automático do passo de translação, o passo ideal é calculado em função da média da velocidade do giro que a recuperadora teve para alcançar o valor do SetPoint do fluxo durante uma direção de giro. Caso a velocidade média do giro para atingir o fluxo desejado seja elevada é aumentado o tempo ou distância do passo da translação, caso seja muito baixo o tempo ou distância do passo de translação é reduzido.

Quanto maior o passo de translação menor será a velocidade de giro necessária para a recuperadora atingir o setpoint e menor serão as perdas causadas por mudanças de direção no giro, em contrapartida, maior será a possibilidade de ocorrência de sobrefluxos e sobrecargas na roda de caçamba. Quanto menor o passo de translação maior será a velocidade de giro necessária para a recuperadora atingir o setpoint causando maiores perdas devido a mudança de direção do giro. A idéia é ajustar o passo translação de forma a fazer com que o fluxo desejado seja atingido a uma determinada velocidade ideal para cada direção do giro.

A lógica para controle do passo de translação foi configurado no CLP da recuperadora e o resultado é demonstrado nas figuras 13 e 14. Antes da implantação do controle de passo da translação o giro em cada direção, na camada de base, durava em torno de 2 minutos, conforme demonstrado na figura 13. Após a implantação do controle de passo da translação, o giro em cada direção, na camada de base passou a ter duração média de 5 minutos, Figura 14, reduzindo perdas por mudança de direção do giro e aumentando a produtividade.



**Figura 13** – Tempo em cada direção do giro antes da implantação do controle de passo da translação



**Figura 14** – Tempo em cada direção do giro após da implantação do controle de passo da translação

## 4 RESULTADOS

O objetivo do trabalho para otimização do controle de fluxo em Recuperadoras é o aumento de produtividade, com redução de variabilidade e sobrefluxos. A variabilidade ou coeficiente de variação ( $Cv$ ) é calculada dividindo-se o desvio padrão ( $\sigma$ ) pela média de fluxo ( $\mu$ ):

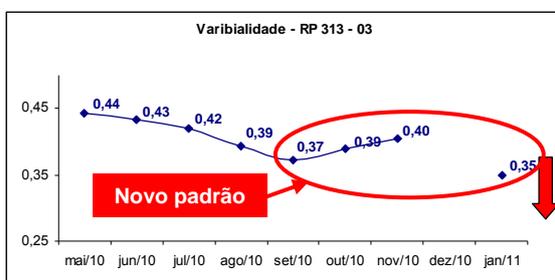
$$Cv = \sigma / \mu \quad (2)$$

No TPM é considerado sobrefluxo um fluxo de recuperação acima de 10000 ton/h durante um período maior ou igual a 5 segundos.

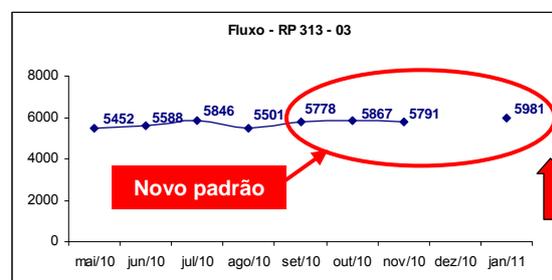
Serão demonstrados neste artigo os resultados obtidos com a implantação do trabalho de otimização do controle de fluxo na Recuperadora RP-313K-03 e Empilhadeira-Recuperadora ER-313K-04. O mesmo trabalho foi replicado para as outras máquinas de pátio do TPM e resultados similares foram obtidos.

### 4.1 RP-313K-03

Através das Figuras 15, 16 e 17 foi possível perceber que após a implantação do trabalho de otimização do controle de fluxo na RP313K03 foi possível obter um aumento médio de 5% na produtividade com redução média de 10% na variabilidade e 20 % na ocorrência de sobrefluxo. .



**Figura 15** – Evolução de variabilidade da RP-313K-03



**Figura 16** –Evolução do Fluxo da RP-313K-03

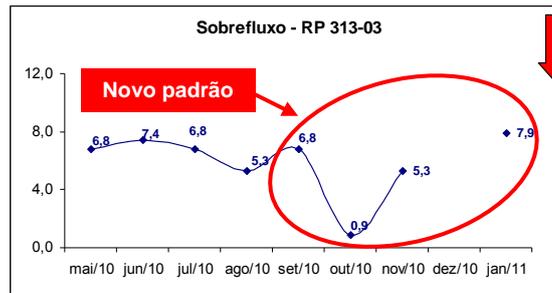


Figura 17 –Evolução do sobrefluxo da RP-313K-03.

## 4.2 ER-313K-04

Para a ER-313K-04 o resultado foi ainda melhor, pois, como demonstrado nas figuras 18, 19 e 20 houve um aumento médio de 9% na produtividade com redução média de 20% na variabilidade e 39 % na ocorrências de sobrefluxo.

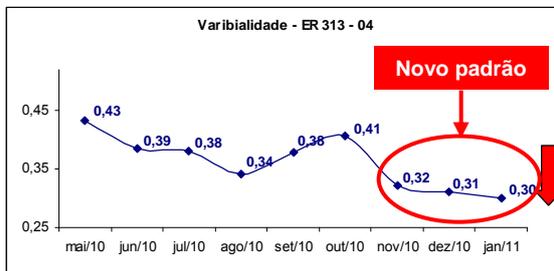


Figura 18 –Evolução da variabilidade da ER-313K-04

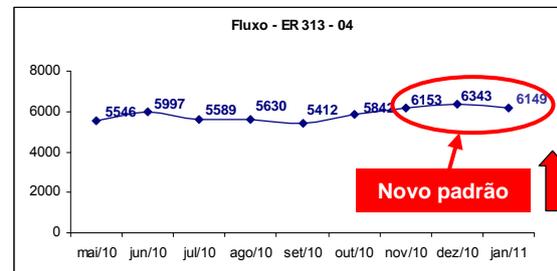


Figura 19 –Evolução do fluxo da ER-313K-04

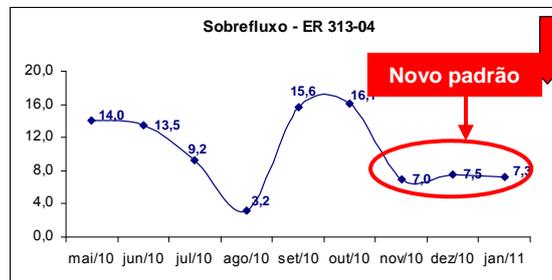


Figura 20 –Evolução do sobrefluxo da ER-313K-04

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho demonstraram que o novo padrão adotado pela Vale para o processo de recuperação de minério de ferro no TPM, trouxe um aumento significativo de produtividade em suas operações. Além do ganho de produtividade, foi possível obter uma redução em perdas operacionais com a redução da ocorrência de sobrefluxo durante o processo de recuperação.

Devido aos ganhos obtidos, este novo padrão de controle de fluxo desenvolvido no TPM foi estabelecido como o padrão a ser utilizado pelos demais portos da Vale.

**REFERÊNCIAS**

- 1 Astrom, K., Hang C., Lim, B., 1994. A New Smith Predictor for Controlling a Process with a Integrator and Long Dead Time. *IEEE Transaction on Automatic Control* 39(2): 343-345
- 2 Hagglund, T., 1992. A Predictive PI Controller for Processis with Long Dead *Time*. *IEEE, Control Systems*, pp57-60.
- 3 Smith, O. J. M., 1957. Closed Control of Loops With Dead-Time, *Chem. Eng. Progress*; 53:217-219.
- 4 Astrom, K. J., Hagglund T., *PID Controllers: Theory, Design, and Tunning*. 2ª Edition, Instrument Society of America, 1995.
- 5 Aguirre, L. A., 2000. A nonlinear dynamical approach to system identification, *IEEE Circuits & Systems Society Newsletter* 11(2): 10-23,47.
- 6 Aguirre, L. A., 2007. *Introdução a Identificação de Sistemas. Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. Editora UFMG, Belo Horizonte - MG. Brasil, 3a edição.
- 7 Lopes, B. E, Corrêa, M. V., Teixeira, R. A. and Moura, J. P., 2010. Método de Análise dos Autovalores para seleção de ordem de modelos lineares. *Anais do 18º Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito MS, pp. 498—504