

# IMPLANTAÇÃO DE CONTROLE DE FLUXO EM VIRADORES DE VAGÕES<sup>1</sup>

Bruno Eduardo Lopes<sup>2</sup>  
Daniel Alcoforado Perez<sup>3</sup>

## Resumo

O controle de fluxo dos Viradores de Vagões (VVs) era feito em malha aberta, ou seja, os operadores ajustavam manualmente a velocidade dos alimentadores (ALs) para fazer com que o fluxo obtido fosse igual ao fluxo desejado. O problema é que estes ajustes manuais nem sempre eram realizados da forma adequada e o resultado é uma perda de produtividade e a ocorrência de sobrefluxo nos alimentadores. Este trabalho demonstra as técnicas de controle, modelagem e identificação utilizados para implantação do controle de fluxo em malha fechada nos VVs do Terminal Marítimo Ponta da Madeira.

**Palavras-chave:** Virador de vagão; Controle de fluxo; Identificação de sistemas.

## IMPLANTAÇÃO DE CONTROLE DE FLUXO EM VIRADORES DE VAGÕES

### Abstract

The flow control of the car dumper (VV, in Portuguese) used to be done in open loop, i.e., operators used to manually adjust the speed of the feeders (AL, in Portuguese) to make the actual flow equal to the desired flow. The problem was that these manual adjustments were not always performed properly and the result was a loss in productivity and the occurrence of overflow on the feeders. This work demonstrates the techniques of control, modelling and identification used for the implementation of flow control in closed loop in the car dumpers at the Ponta da Madeira Maritime Terminal, Vale.

**Key words:** Car dumper; Flow control; Identification system.

<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> *Mestre em Engenharia Industrial Elétrica. VALE.*

<sup>3</sup> *Mestre em Engenharia de Controle e Automação. VALE.*

## 1 INTRODUÇÃO

O virador de vagão (VV) é uma estrutura que promove o giro do vagão a cerca de 160° (máx de 180°) em seu eixo horizontal com o travamento do vagão por um sistema de ancoragem. O minério durante o giro cai num sistema chamado de alimentador e é direcionado para uma correia transportadora que conduzirá o material ao pátio de estocagem ou diretamente ao navio. A utilização do VV traz como benefício uma maior agilidade no processo de descarga de vagões em comparação a outros métodos utilizados na atualidade.

O sistema de descarga do TPM (Terminal Marítimo de Ponta da Madeira) da Vale é composto, atualmente por 04 (Quatro) Viradores de Vagões, com capacidade de produção nominal de 8.000 ton/h, fazendo o descarregamento de 02(dois) vagões simultâneos

O virador de vagão instalado no Terminal Marítimo Ponta da Madeira possui os seguintes sistemas que operam de maneira totalmente integrada:

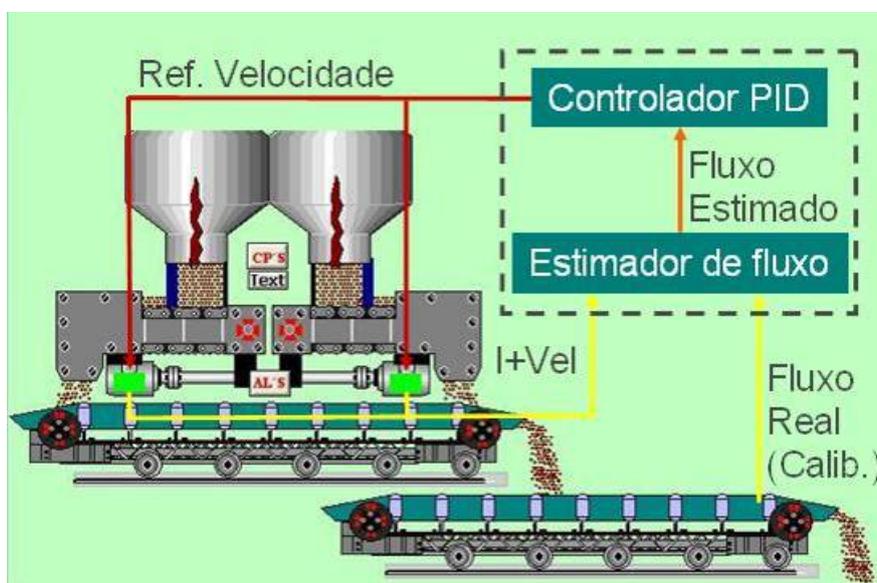
- virador
- carro posicionador
- guincho do carro posicionador
- 2 moegas
- 2 alimentadores de sapata
- transportador de correia móvel reversível
- subsistemas (unidades hidráulicas, unidades de lubrificação, travas hidráulicas etc.).

Anteriormente, o controle de fluxo dos viradores de vagões no TPM era realizado em malha aberta, ou seja, para fazer o controle de fluxo os operadores ajustavam manualmente a velocidade dos alimentadores, conforme demonstrado na Figura 1, até fazer com que o fluxo obtido fosse igual ao fluxo desejado. Porém, com intuito de manter o nível das tremonhas dos viradores de vagões próximos um do outro, o operador diminuía ou aumentava a diferença de velocidade entre os alimentadores, e depois tentava encontrar uma nova relação de velocidade para fazer com que o fluxo real seja igual ao desejado. O problema era que estes ajustes manuais nem sempre eram realizados da forma adequada, com isso, o resultado era uma perda de produtividade ou a ocorrência de sobrefluxo nos alimentadores.



**Figura 1.** Ajuste manual da velocidade dos alimentadores do VV01.

Basicamente, o controlador de fluxo implantado nos VVs é um controle malha fechada, onde a variável de processo é o fluxo estimado do material nas saídas dos alimentadores de sapatas do virador e as variáveis de controle são as velocidades de rotação dos referidos alimentadores. O fluxo de material estimado é uma grandeza calculada a partir das velocidades e correntes dos alimentadores e corrigida com a leitura da balança física existente em um ponto posterior da linha de descarga. O diagrama da lógica de controle de fluxo está apresentado na Figura 2.



**Figura 2:** Diagrama da lógica de controle de fluxo.

Este artigo demonstra as teorias utilizadas para realizar a implantação deste controlador de fluxo e os resultados obtidos com esta implantação.

## 2 ESTIMADOR DE FLUXO

### 2.1 Modelagem Matemática dos Dados

Em função do elevado tempo de atraso dos VVs em relação às balanças existentes na linha de descarga, que impossibilitaria a implantação de um controle do fluxo foi necessário desenvolver um modelo matemática que represente o fluxo de descarga dos VVs (fluxo estimado). A utilização do fluxo estimado como variável de processo (PV) elimina o tempo de atraso, também conhecido como tempo morto,<sup>(1-4)</sup> possibilitando a implantação da lógica para controle de fluxo.

Para desenvolvimento do fluxo estimado foi necessário, inicialmente, fazer aquisição dos dados de fluxo real (através da balança da linha), da corrente e velocidade dos ALs. Após fazer a aquisição dos dados foi criado um modelo matemática relacionando os dados aquisitados para obter um fluxo estimado. Para representar matematicamente o fluxo estimado foi utilizado o modelo linear ARX, cujo os conceitos estão bem demonstrados por Aguirre, em 2007<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. em 2010.<sup>(7)</sup>

O modelo matemático obtido para o VV01 utilizando do estimador de mínimos quadrados é demonstrado abaixo.

$$y(t) = (-3.445 * u1(t)) + (80.31 * v1(t)) - (0.5513 * u2(t)) + (89.11 * v2(t)) \quad (1)$$

sendo,  $y$  = fluxo estimado,  $u1$  = Corrente do AI01,  $v1$  = Velocidade do AI01,  $u2$  = Corrente do AI02,  $v2$  = Velocidade do AI02.

O modelo 1 foi implantado no CLP do VV01 e a Figura 3, dados reais extraído do PIMS, demonstra uma comparação do fluxo estimado (Verde) com um fluxo real (Rosa). Analisando a figura, conclui-se que o fluxo estimado possui uma boa representação do fluxo real.

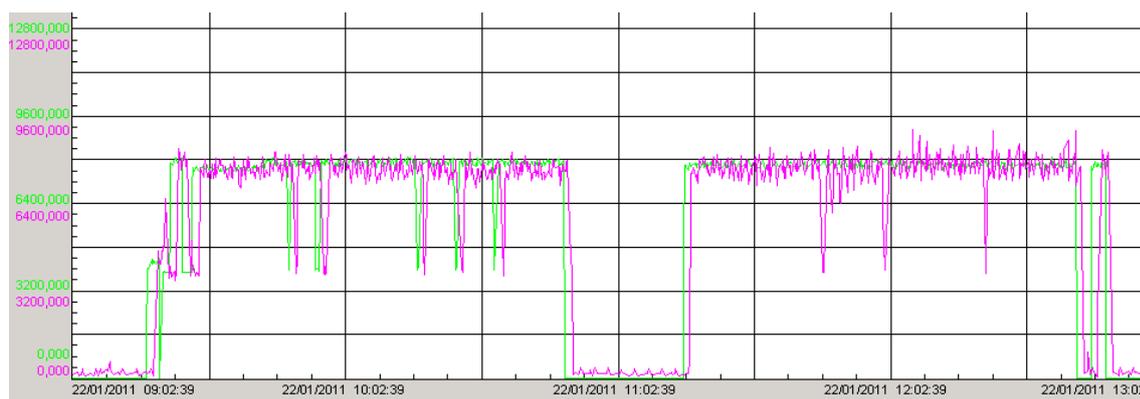


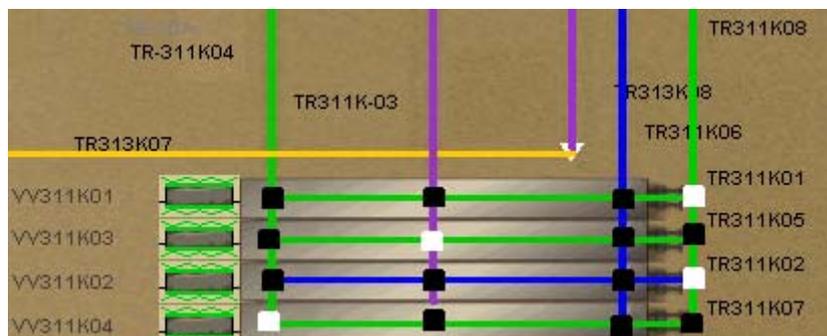
Figura 3 – Comparativo do fluxo estimado com o real.

### 2.2 Aprendizagem por Reforço

Para garantir que o fluxo estimado seja corrigido ao longo do tempo foi implementado uma nova técnica de aprendizagem por reforço. Esta técnica consiste em comparar os resultados do fluxo estimado com o fluxo real para criar um fator de correção que será aplicado ao fluxo estimado. Este fator de correção é então

aplicado ao fluxo estimado. A lógica de aprendizagem por reforço foi implantada dentro do sistema de supervisão do Virador de Vagão.

Como demonstrado na Figura 4, cada Virador de Vagão poderá estar operando em quatro linhas de descarga e uma linha pode estar sendo operada por mais de um virador de vagão.

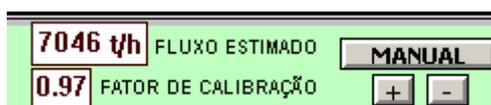


**Figura 4** – Viradores de Vagões e suas linhas de descarga.

As seguintes informações foram utilizadas para poder desenvolver a técnica de aprendizado por reforço:

- Saber qual a linha de descarga o Virador de Vagão está operando;
- Saber se existe outro Virador de Vagão descarregando na linha, pois, caso exista o controle de fluxo deverá ser desativado;
- Saber qual o tempo de atraso entre o Virador de Vagão e a balança da linha escolhida para a descarga.

Para acompanhar os valores de fluxo estimado foi disponibilizada para o operador as informações demonstradas na figura 5. O operador poderá, através do Sistema Supervisão, verificar o valor do fluxo estimado, o valor do fator de calibração obtido pela técnica de aprendizagem por reforço e poderá também Ativar/Desativar a calibração da fluxo estimado.



**Figura 5** – Informações para monitoramento do fluxo estimado.

A Figura 6 demonstra o desempenho da técnica de aprendizagem por reforço. É possível verificar através da figura que existe um erro entre o fluxo estimado (Vermelho) e fluxo real (Azul) apresentado pela balança. No momento que foi ativado a calibração do fluxo estimado (utilizando técnica de aprendizagem por reforço) o fluxo estimado corrigido (Verde) passou a representar corretamente o fluxo real.



**Figura 6** – Comparativo do fluxo real (Azul) X Fluxo estimado (Vermelho) X Fluxo estimado corrigido (Verde).

### 3 CONTROLE DE FLUXO

Para o controle de fluxo é necessário que o operador informe o fluxo desejado (SP - SetPoint) e um controlador PID ajustará as velocidades dos ALs (CV – Variável Controlada) para fazer com que o fluxo estimado corrigido seja igual ao fluxo desejado.

Além de informar o fluxo desejado o operador poderá ajustar através do sistema de supervisão a diferença de velocidade entre os ALs. O objetivo é fazer com que o nível das moegas estejam sempre próximos um em relação ao outro. Caso o operador ative o controle de nível esta diferença de velocidade é calculada automaticamente pelo sistema.

A Figura 7 demonstra a tela que foi desenvolvida no sistema supervisão para o ajuste do Setpoint, ajuste na diferença de velocidade entre os ALs e para Ativar/Desativar o controle de fluxo.



**Figura 7** – Tela para ajuste de Setpoint e diferença de velocidade dos ALs.

O modelo matemático utilizado para estimar o fluxo e o controlador PID utilizado para fazer o controle de fluxo foi implantado no CLP do Virador de Vagão. Os principais parâmetros deste PID é demonstrado na Figura 8.

The screenshot shows a 'PID Setup' dialog box with the following fields and values:

Section	Parameter	Value
Tuning Parameters	Controller Gain Kc	0.5
	Reset Ti	0.7
	Rate Td	0.00
	Loop Update	0.50
	Control Mode	E-SP-PV
	PID Control	MANUAL
	Time Mode	TIMED
Inputs	Setpoint SP	6000
	Setpoint MAX(Smax)	16383
	Setpoint MIN(Smin)	0
	Process Variable PV	2164
Output	Control Output CV (%)	39
	Output Max CV (%)	60
	Output Min CV (%)	10
	Scaled Error SE	3836
Flags	TM	1
	AM	1
	CM	0
	OL	1
	RG	0
	SC	0
	TF	0
	DA	0
	DB	0
	UL	0
LL	0	
SP	0	
PV	0	
DN	0	
EN	1	

Buttons: OK, Cancel, Help

Figura 8 – Parâmetros do PID.

### 3.1 Controle de Fluxo Integrado ao Controle de Nível

O virador possui um silo que coleta a descarga dos vagões que estão sendo virados. O silo deverá possuir em cada lado um transmissor de nível que verifica o material que é descarregado por cada vagão.

Este sistema monitora o nível de minério nos silos. O nível será medido nos intervalos que os vagões não estão sendo descarregados. Deverá ser implementado na lógica do CLP as seguintes ações para cada medição de nível:

- Nível baixo na moega: Desativar o controle de fluxo e redução de velocidade dos alimentadores;
- Nível muito baixo da moega: Desativar o controle de fluxo e desligamento dos alimentadores de sapata;
- Nível muito alto na moega: Manter ativado o controle de fluxo e o virador bloqueado para descarga.

O chaveamento entre as lógicas de controle de fluxo para controle de nível é feito automaticamente no CLP conforme apresentado na Figura 9.

Utilizando do transmissor de nível foi possível implementar um controle em cascata entre o nível dos ALs e Fluxo dos VVs. O objetivo é controlar a diferença de velocidade dos alimentadores de forma a manter o nível entre as Moegas sempre próximos um relação ao outro, mantendo o fluxo de descarga no valor desejado.

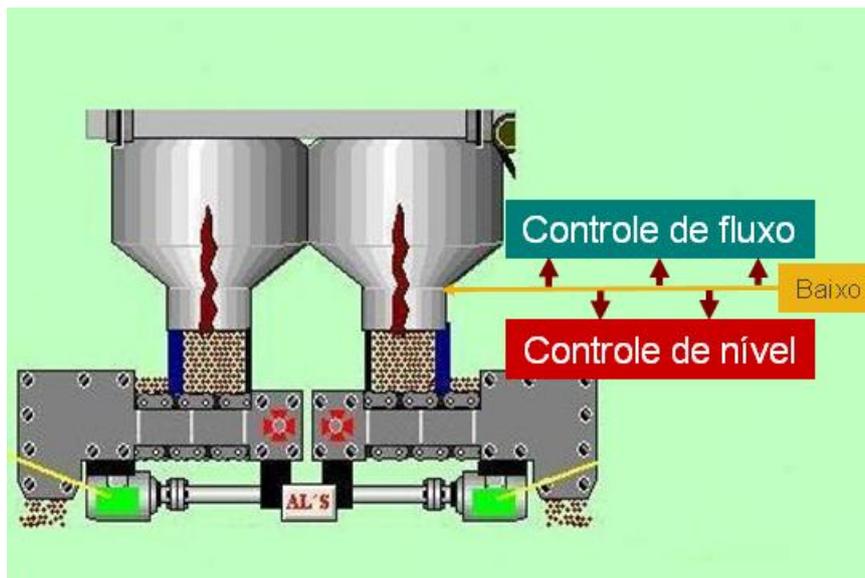


Figura 9: Chaveamento das lógicas de controle de nível e fluxo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Controle de Fluxo

O desempenho obtido com a implantação do controle de fluxo pode ser verificado na Figura 10, onde o operador estabelece diferentes valores de SetPoint (Vermelho) e o controlador ajustou automaticamente a velocidade dos ALs para fazer com que o fluxo estimado corrigido (Verde) seja igual ao Setpoint estabelecido.

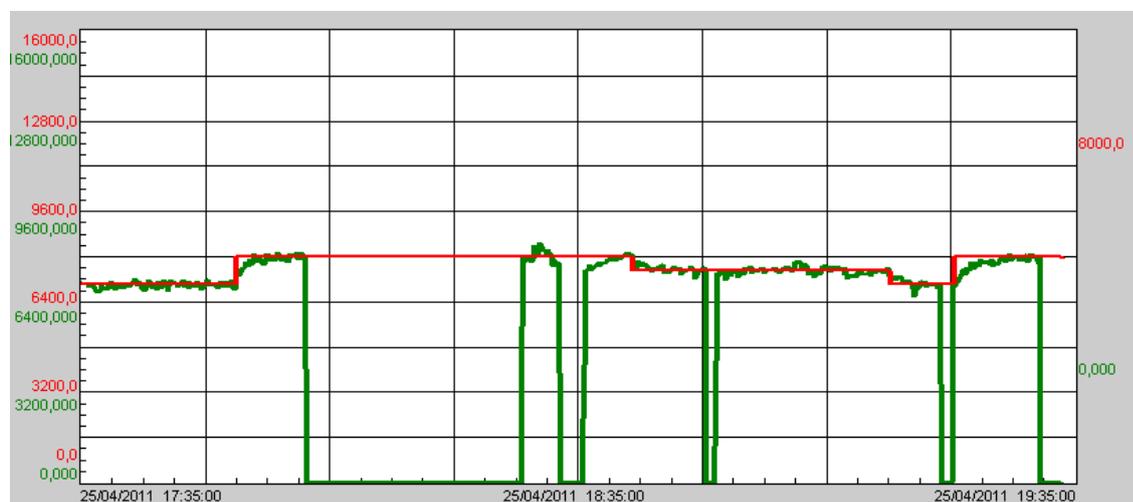


Figura 10 – Performance do Controle de fluxo.

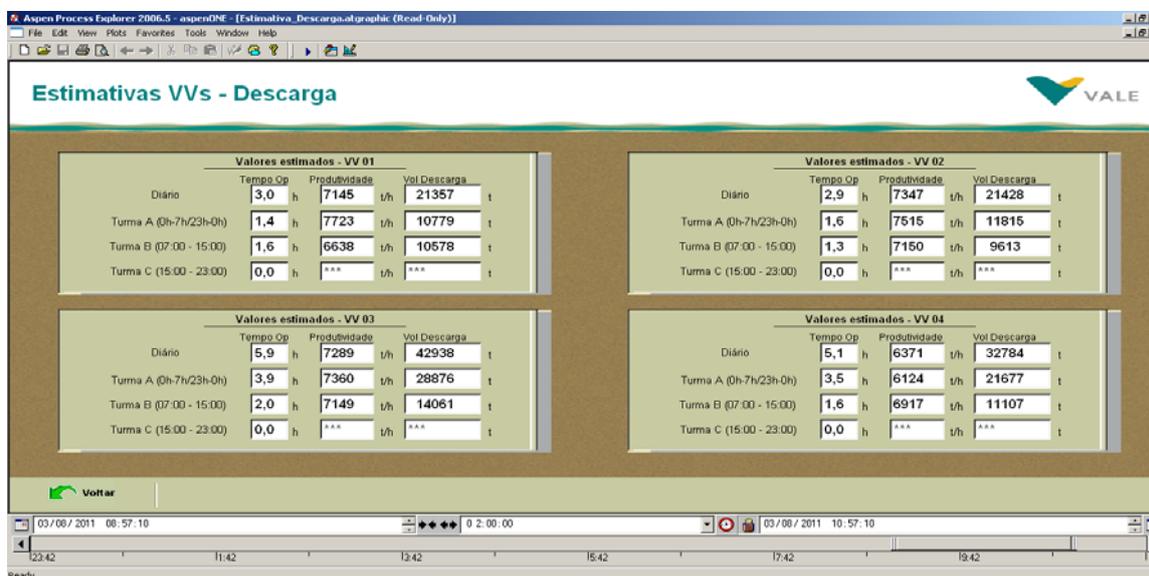
Pode ser verificado através da Figura 10 que o controle de fluxo apresentou bom desempenho, pois a cada mudança de SetPoint o controlador ajustou rapidamente a velocidade dos ALs fazendo com que o fluxo estimado seja igual ao SetPoint. O principal ganho com a implantação do controle de fluxo foi a redução do desvio padrão e variabilidade da taxa média (t/h) de descarga do virador de vagão. Este resultado é demonstrado pela Tabela 1.

**Tabela 1 – Ganhos obtidos com o controle de fluxo**

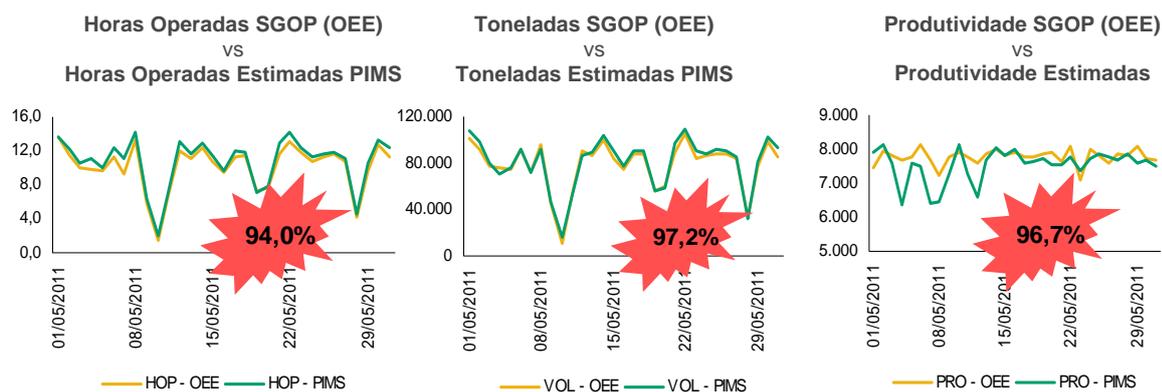
Mês	Taxa média (t/h)	DP Within (t/h)	Cpk:
Abril	7.698	312	0,21
Maio	7.866	192	0,64
Junho	7.859	170	0,70
Julho	7.894	154	0,85

Através da tabela pode ser verificado que após a implantação do controle de fluxo obteve-se como resultado uma redução de 51% no Desvio Padrão (DB Within) da taxa e uma redução de 303% na variabilidade (CPK). Com esta solução teremos um controlador ajustando automaticamente a velocidade dos ALs em busca do fluxo desejado, eliminando assim, a necessidade de intervenções dos operadores. Como consequência foi obtido um aumento 2,5% na taxa média de SINTER, isto representa em média 8h a mais de operação por mês.

Utilizando da variável fluxo estimada foi possível desenvolver uma solução para acompanhamento de produtividade dos VVs de forma OnLine. Os ganhos com a implantação desta solução foi o aumento do nível de informações no processo de descarga, pois, só assim foi possível obter de forma online as informações de produtividade, volume descarregado e tempo de operação do dia para cada Virador de Vagão. A Figura 11 demonstra um exemplo de acompanhamento destas informações através do PIMS.


**Figura 11 – Tabela desenvolvida na tela descarga para acompanhamento dos valores estimados**

Foi realizado um comparativo dos valores estimados do VV01 com dados extraídos do SGOP durante o mês de maio/2011 e o resultado pode ser verificado na Figura 12, onde demonstra que o Percentual de precisão dos dados estimados está próximo dos 100%.



**Figura 12** – Comparativo de dados extraídos do SGOP com os dados obtidos pelo fluxo estimados

É importante ressaltar que a maior diferença entre o comparativo do PIMS com o SGOP está na quantidade de horas operadas, o valor de horas operadas apropriado pelo operador é sempre inferior ao calculado pelo PIMS. Isto demonstra um possível problema com a apropriação de horas operadas feitas pelo operador.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho demonstrou que o novo padrão adotado pela Vale para o processo de controle de fluxo de descarga de minério de ferro dos Viradores de Vagões no TPM, trouxe uma redução significativa na variabilidade e desvio padrão com aumento de produtividade em suas operações. As reduções demonstram o principal ganho do projeto, pois, a constância do fluxo é sadio para o equipamento, bem como para toda a rota.

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.
- 7 ASTROM, K. J., Hagglund T., *PID Controllers: Theory, Design, and Tunning*. 2ª Edition, Instrument Society of America, 1995.
- 4 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.
- 5 AGUIRRE, L. A., 2000. A nonlinear dynamical approach to system identification, *IEEE Circuits & Systems Society Newsletter* 11(2): 10-23,47.
- 6 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