

CONTROLADOR PID PARA O CONTROLE DE VAZÃO DE SÓLIDOS EM SISTEMAS INDUSTRIAIS COM APLICAÇÃO EM VIRADORES DE VAGÕES

JOSÉ PINHEIRO DE MOURA* BRUNO FRANÇA COELHO† JOÃO VIANA DA FONSECA NETO†

*UEMA - Cidade Universitária Paulo VI, Brasil

†UFMA - Cidade Universitária Dom Delgado, Brasil

Email: josepinheiro@professor.uema.br brunofranca08@gmail.com
jviana@dee.ufma.br

Abstract— Car dunper is a large industrial equipment, which consists of unloading wagons loaded with solids in supply silos on steel mats. The flow of solids in wagon turners is the process of emptying the supply silos by varying the speed of rotation of the steel conveyor feeders. The control of the flow of solids in the industry is done, in most cases, empirically, by varying the speed of rotation of the feeders, that is, based on the operator's expertise. In this paper we present a conventional PID controller tuning model tuned by the second Ziegler-Nichols. To evaluate the performance of the proposed controller, the results are compared with an existing PI controller in the plant.

Keywords— Car dunper, Supply silos, Steel conveyor, Solid flow, PID control.

Resumo— Virador de vagões é um equipamento industrial de grande porte, que consiste em descarregar vagões carregados com sólidos em silos de abastecimento sobre esteiras de aço. A vazão de sólidos em viradores de vagões é o processo que consiste no esvaziamento dos silos de abastecimentos por meio da variação de velocidade de rotação dos alimentadores de esteiras de aço. O controle da vazão de sólidos na indústria é feito, na maioria das vezes, de forma empírica, variando-se a velocidade de rotação dos alimentadores, isto é, com base na expertise do operador. Neste artigo apresenta-se um modelo de sintonia de controlador PID convencional sintonizado pelo segundo método de Ziegler-Nichols. Para avaliar o desempenho do controlador proposto, os resultados são comparados com um controlador PI existente na planta.

Palavras-chave— Virador de vagões, Silos de abastecimento, Esteiras de aço, Vazão de sólidos, Controlador PID.

1 Introdução

Controladores PID são muito usados em controle de processos industriais, isto deu-se devido a simplicidade dos algoritmos de controladores com ações proporcionais, integrais e derivativas (PID) associados com seu bom desempenho (Shah and Agashe, 2016). Isto fizeram com que esses controladores tivessem boa aceitação na indústria (Lee et al., 2008), (Pai et al., 2010). Em suma a estrutura de equação integro diferencial do PID permite que as ações advindas da combinação dos três termos seja representada na forma de polinômios em s ou em z . Desta forma, os métodos de sintonia desempenham um importante papel na determinação dos ganhos que são imbuídos das propriedades de otimalidade, adaptabilidade e robustez do sistema de controle aplicado a um modelo matemático da planta.

É prática comum reduzir um processo real a um modelo de ordem baixa, porque a maioria das regras de ajuste para o controlador industrial do tipo PID é baseada em modelos de baixa ordem (Shamsuzzoha and Lee, 2008), (Lee et al., 1998). Também é bem conhecido que o modelo de segunda ordem representa a dinâmica do processo real melhor que o modelo de primeira ordem para vários processos industriais. O projeto do controlador PID tem sido discutido extensivamente na literatura para processos estáveis e instáveis, mas o projeto de um controlador simples e robusto

com desempenho aprimorado ainda não foi totalmente alcançado (Rivera et al., 1986).

A razão fundamental para a obtenção de um modelo matemático de um sistema dinâmico é a necessidade de existência deste modelo para que se possa desenvolver um controlador para o sistema dinâmico (Zhu and Azar, 2015). A estimação do modelo matemático para o sistema de controle de vazão de sólidos aplicados em Viradores de Vagões (VV), foi concebido com base em dados reais do processo operacional de descarregamento de vagões, com isso, estimou-se um modelo para representar os aspectos físicos do processo na sua quase totalidade. A identificação de sistemas pode ser feita por meio de análise da dinâmica do sistema físico e o desenvolvimento de um modelo matemático a partir do comportamento do processo (Schwarzenbach and Gill, 1978).

A identificação de sistemas, também pode ser feita por meio de análise computacional ou modelagem empírica que envolve coleta de dados das características de entrada-saída do sistema e utilização destes para obtenção de um modelo matemático que aproxima este comportamento observado (Luenberger, 1979). Usou-se dados reais coletado da planta por um sistema de gerenciamento de informações e com o uso do *software MATLAB* obteve-se o modelo matemático da planta em estudo.

Neste trabalho propõe-se um controlador PID convencional sintonizado pelo segundo método

de *Ziegler-Nichols*, denominado de controlador PID-ZN, para o controle de vazão de sólidos aplicado ao processo operacional de um virador de vagões. Controladores PID é muito usado em processos industriais, mas para controle de vazão de sólidos em descarregamento de vagões por VV é uma novidade. A relevância deste trabalho é, principalmente, a contribuição técnico/científica inserida em um processo industrial complexo como a operação de descarregamento de vagões por um VV, tendo um controlador PID convencional no controle operacional de vazão de sólidos com seus parâmetros de ganhos sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*.

O trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 faz-se uma breve descrição do processo operacional da planta. Na Seção 3 apresenta-se a formulação do problema, a concepção do modelo matemático e o projeto do sistema de controle proposto. Na Seção 4 os resultados simulados são apresentados e analisado. Por fim na Seção 5 apresenta-se a conclusão do artigo.

2 Descrição Operacional da Planta

Viradores de Vagões são equipamentos utilizados no descarregamento de vagões com granéis. Estes são giratórios que giram até 180°, em cada movimento de giro são descarregados dois vagões, os vagões são conjugados, isto é, entre um vagão e outro tem um engate fixo, chamado de barra fixa e nas extremidades de cada par de vagões os engates são móveis, permitindo o giro dos vagões durante a descarga sem ser necessário desacoplar (separar) os mesmos, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1: Virador de vagões.

O VV ao executar o movimento de rotação de giro, a carga dos vagões é transferida para os silos, conforme ilustrado na Figura 2, que é direcionada para uma rota operacional que é composta dos seguintes equipamentos: virador de vagões; alimentadores de esteiras de aço (AL); correias transportadoras (CT) e empilhadeiras (EP) que executam o empilhamento da carga no pátio de estocagem.



Figura 2: Silos com carga.



Figura 3: Silos vazios

A Figura 4 representa o esquemático dos silos com os alimentadores de esteiras, as setas indicam o sentido de rotação de cada AL, os controladores PID-ZN atuam diretamente na variação da velocidade de rotação dos alimentadores para manter o fluxo horário da carga desejada que é de 8000t/h para cada VV, sendo 4000t/h em cada AL.

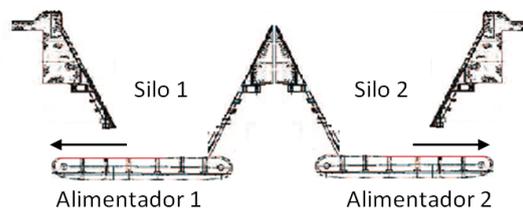


Figura 4: Esquemático de um silo com os alimentadores

3 Formulação do Problema

Em geral, denota-se a entrada e a saída do sistema no tempo t por $u(t)$ e $y(t)$, respectivamente (Åström and Wittenmark, 2013). Uma das relações mais básica entre a entrada e a saída é dada pela equação:

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_ny(t-n) = b_1u(t-1) + \dots + b_mu(t-m) \quad (1)$$

Neste trabalho optou-se por representar, primeiramente, o sistema em tempo discreto, principalmente porque os dados observados são sempre coletados por amostragem. Assim, é mais

fácil relacionar dados observados com modelos de tempo discretos. Na Eq. (1) assume-se que o intervalo de amostragem é uma unidade de tempo (Ljung, 1999). Isso não é essencial, mas facilita a notação.

Uma maneira pragmática e útil de ver a Eq. (1) é observar o próximo valor de saída dado observações anteriores, que é dado por:

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) \quad (2)$$

Para uma notação mais compacta, introduz-se os vetores:

$$\theta = [a_1 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_m]^T, \quad (3)$$

$$\phi(t) = [-y(t-1) \quad \dots \quad -y(t-n) \quad u(t-1) \quad \dots \quad u(t-m)]^T \quad (4)$$

Sendo θ o vetor de parâmetros e ϕ o vetor de regressores.

A Eq. (2) pode ser reescrita como:

$$y(t) = \phi^T(t) \theta. \quad (5)$$

Salienta-se que o cálculo de $y(t)$ de dados passados da Eq. (2) de fato depende dos parâmetros θ , onde este valor calculado $\hat{y}(t|\theta)$ é o valor estimado que é dado por

$$\hat{y}(t|\theta) = \phi^T(t) \theta. \quad (6)$$

No processo de descarga de vagões consiste de um equipamento (VV) que faz a descarga dos mesmos, de dois silos de abastecimentos e dois Alimentadores (AL) de esteiras que controla a vazão de saída do sólido a granel dos silos:

- $v(t)$ Referência de velocidade do AL;
- $y(t)$ Carga medida na balança.

Neste artigo o modelo desenvolvido $y(t)$ depende de $v(t)$. A variação de velocidade do AL é diretamente proporcional a carga medida na balança. A carga média é $y(t)$. Isso sugere o seguinte modelo:

$$y(t) = y(t-1) + \theta v(t-1). \quad (7)$$

Que se encaixa na forma dada por:

$$y(t) = \theta_1 y(t-1) + \theta_2 v(t-1). \quad (8)$$

Este é um modelo de uma entrada $v(t)$ e uma saída $y(t)$ que corresponde à escolha

$$\phi(t) = [-y(t-1) \quad v(t-1)]^T. \quad (9)$$

3.1 Concepção do Modelo Matemático da Planta

Nesta Seção apresenta-se a modelagem matemática para a implementação de controladores que otimizem o fluxo da carga dinâmica na saída dos silos. Conforme ilustrado na Figura 5, a planta consiste em dois VV e uma EP, para modelagem, separa-se em duas subplantas com uma entrada e uma saída cada subplanta, o somatório das saídas das subplantas é a saída geral da planta. O controlador proposto atua na variação de velocidade de cada AL para manter o *setpoint* de 8000t/h por VV e o *setpoint* da planta que é 16000t/h.

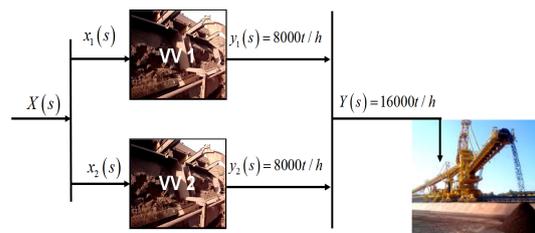


Figura 5: Planta de Descarregamento de dois VV para uma EP

O modelo matemático foi concebido por meio de dados reais coletados da planta, para o desenvolvimento do modelo matemático. O sinal de entrada da planta é a referência de velocidade dos AL e como sinal de saída a vazão da carga medida pela balança. O tempo da carga ser transferida dos AL até a balança é de 40 segundos. Na Figura 6, ilustra-se o fluxo da carga destacado em vermelho e a balança destacada em azul.

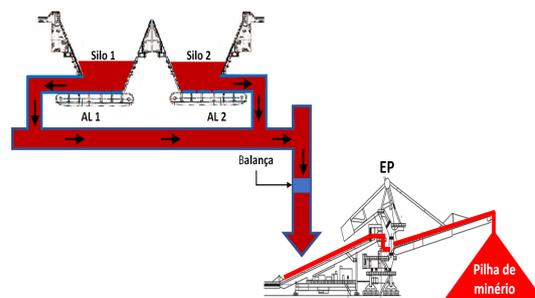


Figura 6: Fluxo de carga dos AL até a pilha no pátio de estocagem.

Para desenvolver um controlador para atuar no controle da vazão de sólidos dos silos, foi necessário estimar um modelo com base nos dados de referências da intensidade da corrente elétrica (I) dos motores de acionamentos dos AL e relacionar com a vazão da carga medida pela balança. Com esses dados tratado e simulados no *software MATLAB*, foi gerado um modelo estimado do processo da planta. O modelo em espaço de estado foi concebido com dados reais da planta de descarregamento de vagões, usando-se do método

de subespaço (Mínimos Quadrados) e do algoritmo de busca *Numerical algorithms for Subspace State Space System Identification (N4SID)*. Nas Eqs. (10) e (11) está a representação geral da planta em espaço de estado em tempo discreto.

$$x(t + Ts) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \quad (10)$$

$$Y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t) \quad (11)$$

3.2 Projeto do Sistema de Controle PID-ZN

Nesta Seção, apresenta-se os projetos dos controladores PID sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*. O controlador convencional PID é a estratégia de controle mais frequentemente utilizada na indústria devido à sua simplicidade, desempenho de robustez e disponibilidade de muitos métodos de ajuste efetivos e simples com base em um conhecimento mínimo da planta (Ziegler and Nichols, 1942), (Cohen, 1953), (Murrill, 1967), (Parr, 1998).

Neste artigo são modeladas duas plantas de descarregamento de vagões, uma do VV1 e outra do VV2, apresentadas a seguir:

- Planta do VV1

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0,08728 & -0,205 \\ 0,206 & 0,0009143 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,438 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = [0 \quad 1],$$

$$D_1 = [0].$$

A função de transferência da planta do VV1 é dada por

$$G_1(s) = \frac{0,3438s + 0,03001}{s^2 + 0,08637s + 0,04215}. \quad (12)$$

- Planta do VV2

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0,002905 & -0,03078 \\ 0,0963 & 0,04356 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,1721 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = [0 \quad 1],$$

$$D_2 = [0].$$

A função de transferência da planta do VV2 é dada por

$$G_2(s) = \frac{0,1721s + 0,0005}{s^2 + 0,04646s + 0,003091}. \quad (13)$$

A planta é representada em diagrama de blocos, onde são representadas as plantas do VV1 e VV2, com os controladores PID e os sinais de perturbações, conforme Figura 7. Sendo $R_1(s)$ e $R_2(s)$ as referências, $E_1(s)$ e $E_2(s)$ os erros, $H_1(s)$ e $H_2(s)$ os sensores (balanças), $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ as saídas, K_{VV1}^{pid} e K_{VV2}^{pid} são os ganhos dos controladores PID $U_1(s)$ e $U_2(s)$ as entradas $W_1(s)$ e $W_2(s)$ os sinais de perturbação das plantas VV1 e VV2 respectivamente e finalmente $R(s)$, $U(s)$, $Y(s)$ e $H(s)$ a referência, a entrada, a saída e o sensor da planta geral VV1 mais VV2 simultâneos.

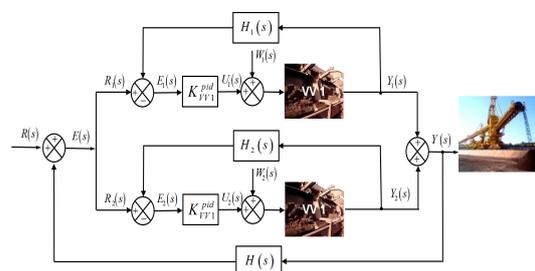


Figura 7: Planta de Descarregamento de dois VV para uma EP com o Controlador PID-ZN.

3.3 Cálculos dos Ganhos dos Controladores

Os ganhos K são obtidos pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* por meio do modelo matemático da planta (função de transferência). De acordo com a Tabela 1, pôde-se usar o segundo método de sintonia de *Ziegler-Nichols* através do lugar das raízes para encontrar o ganho crítico K_{cr} e a frequência das oscilações w_{cr} (sendo $2\pi/w_{cr} = P_{cr}$) (Zhao et al., 1993). Esses valores podem ser encontrados pelo critério *Routh* (Ogata, 2009).

Tabela 1: Regra de ajuste pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* com base no ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} .

Type	K_P	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

O controlador PID é representado por

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d(s) \right) \quad (14)$$

Na Figura 8 representa-se o sistema de controle PID da planta de descarregamento por viradores de vagões.

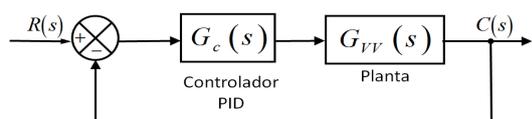


Figura 8: Sistema de controle.

3.3.1 Cálculo dos ganhos K_1 da planta do VV1

A função de transferência em malha fechada com o ganho K_1 para a planta do VV1 é obtida da seguinte forma

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{C_1(s) G_1(s)}{1 + C_1(s) G_1(s)} \quad (15)$$

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{C_1(s) N_1/D_1}{1 + C_1(s) N_1/D_1} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} &= \frac{C_1(s) N_1/D_1}{1 + C_1(s) N_1/D_1} \\ &= \frac{C_1(s) N_1/D_1}{D_1 + C_1(s) N_1/D_1} \\ &= \frac{C_1(s) N_1}{D_1 + C_1(s) N_1} \end{aligned} \quad (17)$$

Substituindo $G_1(s)$ pela a Eq. 12, tem-se

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{K_1(0,3438s + 0,0301)}{(s^2 + 0,08637s + 0,04215) + K_1(0,3438s + 0,0301)} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} a_2 &= 1 \\ a_1 &= (0,08637 + 0,3438K_1) \\ a_0 &= (0,04215 + 0,0301K_1) \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccc} s^2 & a_2 & a_0 \\ s^1 & a_1 & a_0 \\ s^0 & b_1 & \end{array}$$

Aplicando o critério de *Routh* para obter o valor de K_1 , obtém-se

$$b_1 = \frac{a_1 a_0 - a_2(0)}{a_1} \Rightarrow b_1 = 3001K_1 + 0,04215$$

fazendo $b_1 = 0$ tem-se $K_1 = 1,40033$.

A partir do polinômio auxiliar dado na Eq. (19), determina-se a frequência $s = jw$ para a planta do VV1

$$s^2 + (0,04215 + 0,0301 \times 1,40033) = 0 \quad (19)$$

$$s^2 = 0,0843 \Rightarrow s = 0,2903$$

$$K_{cr} = 1,40033, \quad P_{cr} = \frac{2\pi}{f} \Rightarrow P_{cr} = 21,6438.$$

Da tabela 1 tem-se que

$$K_p = 0,6 \times 1,40033 = 0,8427,$$

$$T_i = 0,5 \times 21,6438 = 10,8219,$$

$$T_d = 0,125 \times 21,6438 = 2,7055,$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \Rightarrow K_i = \frac{0,8427}{10,8219} = 0,0779$$

$$K_d = K_p T_d \Rightarrow K_d = 0,8427 \times 2,7055 = 2,2799$$

3.3.2 Cálculo dos ganhos K_2 da planta do VV2

A função de transferência em malha fechada com o ganho K para a planta do VV2 é obtida da seguinte forma

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{C_2(s) G_2(s)}{1 + C_2(s) G_2(s)} \quad (20)$$

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{C_2(s) N_2/D_2}{1 + C_2(s) N_2/D_2} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} &= \frac{C_2(s) N_2/D_2}{1 + C_2(s) N_2/D_2} \\ &= \frac{C_2(s) N_2/D_2}{D_2 + C_2(s) N_2/D_2} \\ &= \frac{C_2(s) N_2}{D_2 + C_2(s) N_2} \end{aligned} \quad (22)$$

Substituindo $G_2(s)$ pela a Eq. 13, tem-se

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{K_2(0,1721s + 0,0005)}{(s^2 + 0,04646s + 0,003091) + K_2(0,1721s + 0,0005)} \quad (23)$$

$$\begin{array}{ccc} s^2 & a_2 & a_0 \\ s^1 & a_1 & a_0 \\ s^0 & b_1 & \end{array}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= 1 \\ a_1 &= 0,04646 + 0,1721K_2 \\ a_0 &= 0,003091 + 0,0005K_2 \end{aligned}$$

Aplicando o critério de *Routh* para obter o valor de K_2 , obtém-se

$$b_1 = 0,003091 + 0,0005K_2 \Rightarrow K_2 = 6,1820$$

A partir do polinômio auxiliar dado na Eq. (24), determina-se a frequência $s = jw$ para a planta do VV2

$$s^2 + 0,003091 + 0,0005 \times 6,1820 \quad (24)$$

$$s^2 = 0,0062 \Rightarrow s = 0,0786$$

$$K_{cr} = 6,1820, \quad P_{cr} = \frac{2\pi}{f} \Rightarrow P_{cr} = 7,9837,$$

Da tabela 1 tem-se que

$$K_p = 0,6 \times 6,1820 = 3,7092,$$

$$T_i = 0,5 \times 7,9837 = 3,9919,$$

$$T_d = 0,125 \times 7,9837 = 0,9980,$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i s} = \frac{3,7092}{3,9919 \times 0,0786} = 0,9292$$

$$K_d = K_p T_d = 3,7092 \times 0,9980 = 3,7017$$

4 Resultados Simulados

Nesta Seção são apresentados os resultados simulados no *software MATLAB/SIMULINK* com base em dados reais coletados da planta. Os resultados são avaliados em uma planta industrial de descarregamento de vagões conforme apresentado na Figura 5.

4.1 Setup da Simulação

O projeto do controlador PID-ZN proposto neste artigo, consiste em dois controladores PID convencionais sintonizados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*. Primeiro os ganhos dos controladores PID-ZN são determinados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e em seguida esses ganhos são inseridos *off-line* de acordo com a variação paramétrica na dinâmica da planta (Zhao et al., 1993).

4.2 Avaliação dos Resultados Simulados

Os resultados são avaliados em uma planta industrial de grande porte, composta por dois VV com capacidades de descarregamento de 8000t/h cada um e uma EP com capacidade de estocagem de 16000t/h. Primeiramente, faz-se a avaliação das plantas do VV1 e VV2 separadas, depois avalia-se o comportamento do processo operacional das plantas simultâneas.

Na Figura 9 apresenta-se o comportamento dos controladores PID-ZN e PI da planta do VV1, nesta observa-se, que o desempenho do controlador PID-ZN foi bem melhor do que o desempenho do controlador PI já existente na planta.

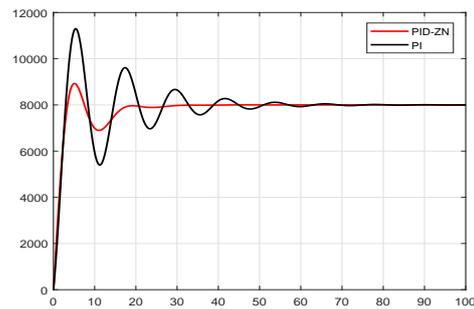


Figura 9: Controlador PID-ZN e PI da planta do VV1

Na Figura 10, apresenta-se o comportamento dos controladores PID-ZN e PI da planta do VV2, nesta observa-se também, melhor desempenho do controlador PID-ZN.

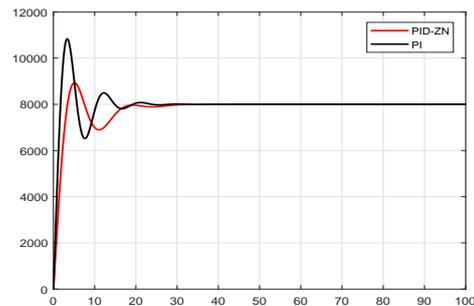


Figura 10: Controladores PID-ZN e PI da planta do VV2.

A planta geral é composta de dois VV e uma EP, conforme apresentada na Seção 3.1. Para controlar a vazão de entrada da EP, são desenvolvidos dois controladores para os modelos da planta: 1) um controlador para a planta do VV1 e 2) um controlador para a planta do VV2, que atuam simultâneos, de forma que, seja alcançado o valor de referência de 16000t/h, conforme apresentado na Figura 11, onde observa-se que o desempenho do controlador PID convencionais sintonizados

pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* alcança o valor de referência de 16000t/h em menor tempo e com pequenas oscilações no início entrando em regime sem perda da trajetória em comparação com o controlador PI já existente na planta.

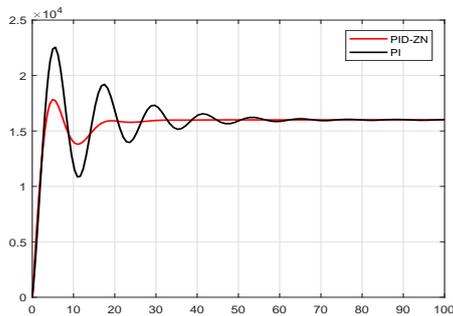


Figura 11: Controladores PID-ZN e PI das plantas VV1 e VV2 simultâneas.

4.3 Rejeição às Perturbações

Distúrbios e incertezas existem em todos os sistemas industriais e trazem efeitos adversos no desempenho e até na estabilidade dos sistemas de controle, a rejeição de perturbações e incertezas é um dos objetivos no projeto de sistemas de controle (Li et al., 2016).

No processo analisado, são inserido sinais de perturbações de 50% do valor de referência para avaliar a rejeição às perturbações nas variações paramétricas nas dinâmicas das plantas. Observa-se, que o sistema de controle proposto, resistiu essas perturbações, de forma que, o seu desempenho é satisfatório, com pequenas oscilações, mantendo-se em torno do ponto de referência.

Na Figura 12, apresenta-se, o comportamento da planta do VV1 com sinal de perturbação de 50% do valor de referência. Observa-se que o controlador PID-ZN teve pequenas oscilações em torno do valor de referência sem perda significativa da trajetória alcançada, enquanto que o controlador PI apresentou maiores oscilações em torno do valor de referência.

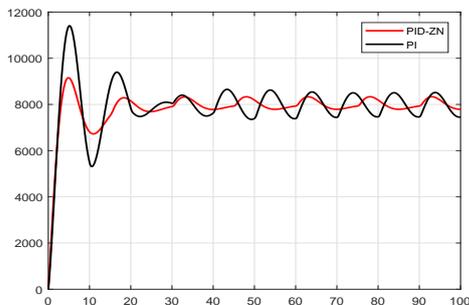


Figura 12: Controladores PID-ZN e PI com perturbação nas dinâmicas da plantas VV1.

Na Figura 13, apresenta-se, o comportamento da planta do VV2 com sinal de perturbação de 50% do valor de referência. Observa-se também, que o controlador PID-ZN teve melhor desempenho, com pequenas oscilações em torno do valor de referência sem perda significativa da trajetória alcançada, enquanto que o controlador PI apresentou maiores oscilações em torno do valor de referência.

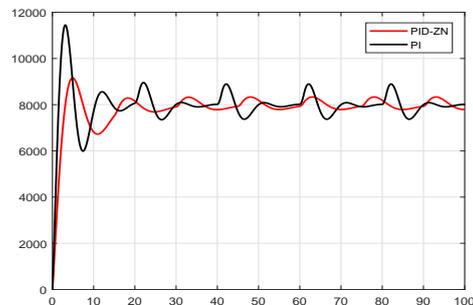


Figura 13: Controladores PID-ZN e PI com perturbação nas dinâmicas da plantas VV2.

Por fim, apresenta-se o comportamento geral da planta, onde as duas subplantas VV1 e VV2 são analisadas simultaneamente por uma única curva que representa o sistema de controle PID-ZN, conforme Figura 14, sendo que, o desempenho do sistema de controle obteve bom desempenho, em resposta a perturbação, oscilando em torno do ponto de referência.

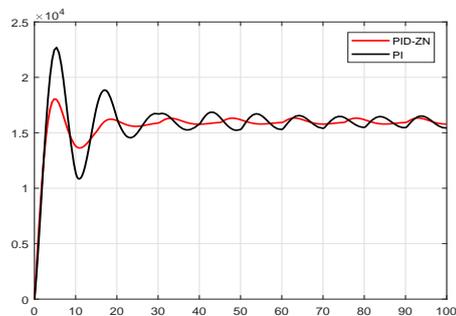


Figura 14: Controladores PID-ZN e PI com perturbação nas dinâmicas da plantas VV1 + VV2 simultâneas.

5 Conclusão

De acordo com os resultados e análises dos experimentos simulados, observa-se que os controladores PID convencionais com ganhos fixos conseguem bons resultados em processos industriais que não têm grandes variações paramétricas na dinâmica da planta. Portanto, conclui-se, que a sintonia de controladores PID convencionais sintonizados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*,

para o controle de vazão de granéis em processos de descarregamento de vagões, têm bons desempenhos, alcançando o valor de referência sem perda da trajetória alcançada.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Maranhão pelos ensinamentos técnicos/científicos e práticos para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos também, à Universidade Estadual do Maranhão pelo apoio à pesquisa. Finalmente, á empresa Vale S.A. por fornecer seus especialistas para orientação prática na execução dos experimentos.

Referências

- Åström, K. J. and Wittenmark, B. (2013). *Computer-controlled systems: theory and design*, Courier Corporation.
- Cohen, G. (1953). Theoretical consideration of retarded control, *Trans. Asme* **75**: 827–834.
- Lee, M., Shamsuzzoha, M. and Vu, T. N. L. (2008). Imc-pid approach: An effective way to get an analytical design of robust pid controller, *Control, Automation and Systems, 2008. IC-CAS 2008. International Conference on*, IEEE, pp. 2861–2866.
- Lee, Y., Park, S., Lee, M. and Brosilow, C. (1998). Pid controller tuning for desired closed-loop responses for si/so systems, *Aiche journal* **44**(1): 106–115.
- Li, S., Yang, J., Chen, W.-H. and Chen, X. (2016). *Disturbance observer-based control: methods and applications*, CRC press.
- Ljung, L. (1999). *Ljung l system identification theory for user*. pdf, PTR Prentice Hall Upper Saddle River NJ **25**: 475–476.
- Luenberger, D. G. (1979). *Introduction to dynamic systems: theory, models, and applications*, Vol. 1, Wiley New York.
- Murrill, P. W. (1967). *Automatic control of processes*, International Textbook Company.
- Ogata, K. (2009). *Modern Control Engineering (5th Edition)*, Prentice-Hall electrical engineering series. Instrumentation and controls series, 5th edn, Prentice Hall.
- Pai, N.-S., Chang, S.-C. and Huang, C.-T. (2010). Tuning pi/pid controllers for integrating processes with deadtime and inverse response by simple calculations, *Journal of Process Control* **20**(6): 726–733.
- Parr, E. A. (1998). *Industrial control handbook*, Industrial Press Inc.
- Rivera, D. E., Morari, M. and Skogestad, S. (1986). Internal model control: Pid controller design, *Industrial & engineering chemistry process design and development* **25**(1): 252–265.
- Schwarzenbach, J. and Gill, K. (1978). *System modelling and control*, J. Wiley.
- Shah, P. and Agashe, S. (2016). Review of fractional pid controller, *Mechatronics* **38**: 29–41.
- Shamsuzzoha, M. and Lee, M. (2008). Design of advanced pid controller for enhanced disturbance rejection of second-order processes with time delay, *AIChE Journal* **54**(6): 1526–1536.
- Zhao, Z.-Y., Tomizuka, M. and Isaka, S. (1993). Fuzzy gain scheduling of pid controllers, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* **23**(5): 1392–1398.
- Zhu, Q. and Azar, A. T. (2015). *Complex system modelling and control through intelligent soft computations*, Springer.
- Ziegler, J. G. and Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers, *trans. ASME* **64**(11).