

# SINTONIA ONLINE DE CONTROLADORES PID SINTONIZADO POR REGRAS FUZZY EM SISTEMAS INDUSTRIAIS COM APLICAÇÃO EM PROCESSO OPERACIONAL DE VIRADORES DE VAGÕES

BRUNO FRANÇA COELHO\* JOSÉ PINHEIRO DE MOURA† JOÃO VIANA DA FONSECA NETO\* PATRÍCIA HELENA MORAES RÊGO†

\*UFMA - Cidade Universitária Dom Delgado, Brasil

†UEMA - Cidade Universitária Paulo VI, Brasil

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

**Abstract**— Car dumper 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 track 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 feeder, that is, based on the operator's expertise. In this paper we present an tuning model of PID controller based on fuzzy logic to control the output flow of the supply silos. To evaluate the performance of the proposed controller, the results are compared with an existing PI controller in the plant tuned by the trial-and-error method and with a PID controller tuned by the second Ziegler-Nichols method..

**Keywords**— Car dumper, Supply silos, Solid flow, PID control, Fuzzy logic.

**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 do alimentador, isto é, com base na expertise do operador. Neste artigo apresenta-se um modelo de sintonia *online* de controlador PID com base em lógica *fuzzy* para controlar a vazão de sólido na saída dos silos de abastecimento. Para avaliar o desempenho do controlador proposto, os resultados são comparados com um controlador PI existente na planta sintonizado pelo método de tentativa e erro e com um controlador PID sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*.

**Palavras-chave**— Virador de vagões, Silos de abastecimento, Vazão de sólidos, Controlador PID, Lógica *Fuzzy*.

## 1 Introdução

O descarregamento de vagões por Viradores de Vagões (VV) é um processo complexo e que requer controladores de alto desempenhos. Mas, é difícil a implementação desses controladores em plantas reais como o processo operacional de VV, o que existe são controles manuais feitos pelos próprios operadores e alguns controladores com ações Proporcionais, Integrativas e Derivativas (PID) com uma ou duas partes nulas.

Na planta do processo operacional de VV em estudo já existe um controlador PID com a ação derivativa nula, onde os ganhos proporcionais e integrativos são determinados por tentativa e erro, sendo estes constantes, caso haja variação na dinâmica da planta, os ganhos do controlador devem ser determinados novamente para atender a nova dinâmica da planta. Para solucionar esse problema, faz-se necessário o desenvolvimento/implementação de controladores de alto desempenho.

A decisão de inserir um controlador de alto desempenho com base em regras *fuzzy* para fazer o escalonamento dos ganhos do controlador PID em tempo real de acordo com a variação na dinâmica da planta, deu-se pelo fato de ser factível a implementação, já que o VV tem seu processo

operacional automatizado desenvolvido em um Controlador Lógico Programável (CLP), que em sua estrutura tem um módulo de programação para sistemas *fuzzy*.

As propriedades de adaptabilidade que promovem a solução adequada para uma nova situação operacional e de otimalidade com o menor custo operacional é uma demanda atrativa que justifica o desenvolvimento de controladores PID de alto desempenho. Para tanto, propõe-se modelos e algoritmos para sistemas de controle para uma classe de problemas atuante no processo de forma sequencial e paralela.

Neste trabalho propõe-se um controlador de alto desempenho com base em regras *fuzzy* para o controle de vazão de sólidos aplicado ao processo operacional de VV. O controle *fuzzy* há muito tempo foi aplicado à indústria com vários resultados teóricos importantes e bem sucedidos. Originalmente introduzido como abordagem de projeto de controle sem modelo. Mas, nas últimas décadas o controle *fuzzy* baseado em modelo ganhou significado generalizado e foi propostos para muitas aplicações industriais, no entanto, combinado com controladores PID convencionais para controle de vazão de sólidos em descarregamento de vagões por VV é uma novidade (de Moura and da Fonseca Neto, 2016).

O controlador adaptativo *fuzzy* é definido como um sistema de lógica *fuzzy* com um mecanismo de adaptação (inferência) (Chen and Chen, 2009), (Hwang et al., 2009). Além disso, é construído a partir de um conjunto de regras *fuzzy IF-THEN* e o mecanismo de adaptação associado pode ajustar *on-line* os parâmetros livres dos sistemas *fuzzy* (Azar and Vaidyanathan, 2015), (Chen et al., 2013), (Lin et al., 2011).

A relevância deste trabalho é, principalmente, a contribuição técnico/científica inserida em um processo industrial complexo como o processo operacional de descarregamento de vagões por VV, tendo um controlador de alto desempenho aplicado no controle de vazão de sólidos com seus parâmetros de ganhos autoajustáveis.

A seguir apresenta-se a organização do artigo: Na Seção 2 faz-se uma breve descrição do sistema. Na Seção 3 apresenta-se a formulação do problema e a concepção do modelo matemático da planta. Na Seção 4 o projeto dos controladores é apresentado. Na Seção 5 os resultados simulados são apresentados e analisados e por fim, na Seção 6 apresenta-se a conclusão do artigo.

## 2 Descrição Operacional da Planta

Viradores de Vagões são equipamentos utilizados no descarregamento de vagões com grânéis. Estes são giratórios que giram até 180°, em cada movimento de rotação 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 Fig. 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 Fig. 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.

## 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:

$$y(t) = -a_1y(t-1) - \dots - a_ny(t-n) + b_1u(t-1) + \dots + b_mu(t-m) \quad (2)$$

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

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

$$\phi(t) = \begin{bmatrix} -y(t-1) & \dots & -y(t-n) \\ u(t-1) & \dots & u(t-m) \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

Sendo  $\theta$  o vetor de parâmetros e  $\phi$  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  $\theta$ , onde este valor calculado  $\hat{y}(t|\theta)$  é o valor estimado que é dado por

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

### 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. 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 (de Moura et al., n.d.). O tempo da carga ser transferida dos AL até a balança é de 40 segundos. Na Fig 3, ilustra-se o fluxo da carga destacado em vermelho e a balança destacada em azul.

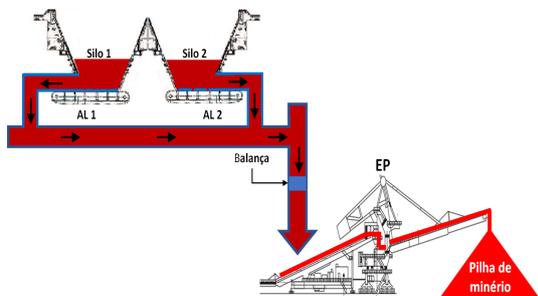


Figura 3: Fluxo de carga dos AL até a pilha no pátio de estocagem.

Para desenvolver um controlador que atue 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)* (Borjas and Garcia, 2004), (Rao and Garnier, 2002).

## 4 Projeto dos Controladores

Nesta Seção, apresenta-se os projetos dos controladores PID sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Niechols* (PID-ZN) e PID sintonizado por regras *fuzzy* (PID-Fuzzy).

### 4.1 Projeto do Controlador PID-ZN

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), (Padula and Visioli, 2011).

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

- **Planta I** - Modelo matemático em função de transferência da planta do VV1 é dada por

$$G_1(s) = \frac{0,3438s + 0,03001}{s^2 + 0,08637s + 0,04215}. \quad (7)$$

- **Planta II** - Modelo matemático em função de transferência da planta do VV2 é dada por

$$G_2(s) = \frac{0,1721s + 0,0005}{s^2 + 0,04646s + 0,003091}. \quad (8)$$

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 Fig. 4. 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  $W_2(s)$  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.

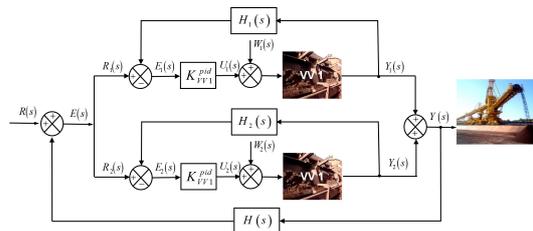


Figura 4: Planta de Descarregamento de dois VV para uma EP com o Controlador PID-ZN.

### 4.2 Cálculos dos Ganhos dos Controladores

Os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são obtidos pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* por meio dos modelos matemáticos das plantas (funções de transferências) (Ogata, 2009). Na Tab. 1, apresenta-se os parâmetros usados para determinar-se o ganho crítico ( $K_{cr}$ ) e o período crítico ( $P_{cr}$ ).

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

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

Aplicando o critério de *Routh* na Eq. (7) para obter o valor de  $K_{cr1}$ , obtém-se:  $K_{cr1} = 1,40033$  e  $s = 0,2903$ . Sendo  $s = jw_1$ .

Para a planta do VV1, tem-se

$$K_{cr1} = 1,40033, \quad P_{cr1} = \frac{2\pi}{jw_1} \Rightarrow P_{cr1} = 21,6438.$$

Sendo  $K_{cr1}$  o ganho crítico e  $P_{cr1}$  o período crítico obtidos da função de transferência da planta do VV1.

Aplicando o critério de *Routh* na Eq. (8) para obter o valor de  $K_{cr2}$ , obtém-se  $K_{cr2} = 6,1820$  e  $s = 0,0786$ . Sendo  $s = jw_2$ .

Para a planta do VV2, tem-se

$$K_{cr2} = 6,1820, \quad P_{cr2} = \frac{2\pi}{jw_2} \Rightarrow P_{cr2} = 7,9837,$$

Sendo  $K_{cr2}$  o ganho crítico e  $P_{cr2}$  o período crítico obtidos da função de transferência da planta do VV2.

### 4.3 Projeto do Controlador PID-Fuzzy

O modelo PID-Fuzzy apresentado neste artigo foi proposto por Zhao e Tomizuka (Zhao et al., 1993). Este foi adaptado para o processo operacional de VV, conforme ilustrado na Figura 5.

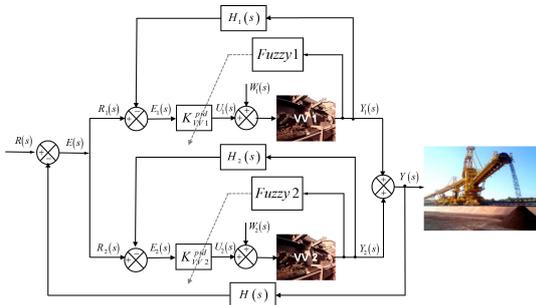


Figura 5: Planta de Descarregamento de dois VV para uma EP com o Controlador PID-Fuzzy.

O sistema de controle utiliza um sistema baseado em regras *fuzzy* para a sintonia do controlador PID por meio do agendamento de ganhos. O sistema *fuzzy* assume que  $K_p$  e  $K_d$  estão em intervalos prescritos em  $[K_{p_{\min}}, K_{p_{\max}}]$  e  $[K_{d_{\min}}, K_{d_{\max}}]$ ,

respectivamente. As entradas do controlador PID-Fuzzy são o erro  $e(t)$  e sua derivada  $\dot{e}(t)$  e as saídas são  $K'_p$ ,  $K'_d$  e  $\alpha$ . Sendo  $K'_p$  e  $K'_d$  os ganhos normalizados num intervalo de 0 a 1 por meio de uma transformação linear e  $\alpha$  é um parâmetro utilizado para o cálculo do ganho  $K_i$ .

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p_{\min}}}{K_{p_{\max}} - K_{p_{\min}}} \quad (9)$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{d_{\min}}}{K_{d_{\max}} - K_{d_{\min}}} \quad (10)$$

No projeto PID-Fuzzy, os parâmetros do PID são determinados com base no erro atual  $e(k)$  e a diferença do erro  $\Delta e(k)$ . A constante de tempo integral é determinada com referência à constante de tempo de derivação, isto é,

$$T_i = \alpha T_d \quad (11)$$

e o ganho integral é obtido a seguir

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} \Rightarrow K_i = \frac{K_p^2}{\alpha T_d} \quad (12)$$

Uma vez que  $K'_p$ ,  $K'_d$  e  $\alpha$  são obtidos, os parâmetros do controlador PID são calculados a partir das seguintes equações

$$K_p = (K_{p_{\max}} - K_{p_{\min}}) K'_p + K_{p_{\min}} \quad (13)$$

$$K_d = (K_{d_{\max}} - K_{d_{\min}}) K'_d + K_{d_{\min}} \quad (14)$$

$$K_i = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \quad (15)$$

Com base em um extenso estudo de simulação em vários processos feito por Zhao and Tomizuka, chegou-se a uma regra geral para determinar-se o intervalo de  $K_p$  e o range de  $K_d$  apresentado na tabela abaixo

Tabela 2: Parâmetros para cálculo de  $K_p$  e  $K_d$ .

$K_{p_{\max}}$	$K_{p_{\min}}$	$K_{d_{\min}}$	$K_{d_{\max}}$
$0.32 K_{cr}$	$0.6 K_{cr}$	$0.08 K_{cr} P_{cr}$	$0.15 K_{cr} P_{cr}$

Os parâmetros  $K'_p$ ,  $K'_d$  e  $K'_i$  são determinados a partir de um conjunto de regras *fuzzy*, como por exemplo:

IF  $e(k)$  is  $A_i$  and  $\Delta e(k)$  is  $B_i$ , THEN  $K'_p$  is  $C_i$  is  $D_i$ , and  $\alpha = \alpha_i$ . Sendo  $i = 1, 2, \dots, m$ .

É ilustrado na Figura 6 a estrutura do projeto de lógica *fuzzy* para lidar com o problema de controle operacional de VV. O projeto de lógica *fuzzy* consiste em um sistema de inferência *fuzzy* do tipo

*Mamdani* com duas entradas que são o erro  $e(t)$  e sua derivada  $\dot{e}(t)$  e três saídas:  $K'_p$ ,  $K'_i$  and  $K'_d$ , estes são os parâmetros *online* do controlador PID. Uma vez que  $K'_p$  e  $K'_d$  são obtidos das Eqs. (9) e (10).

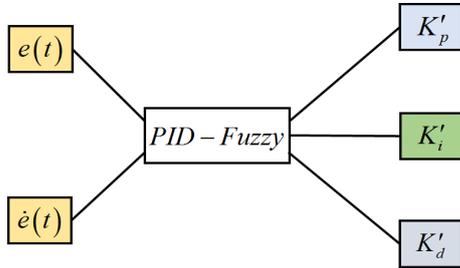


Figura 6: Projeto de lógica *fuzzy* do processo operacional de VV.

O escalonamento dos ganhos  $K^{pid}$  ( $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ ) é feito pelo sistema *fuzzy*, para  $K_p$  e  $K_d$  são seguidas as regras da Tabela 3. Enquanto  $K_i$  é obtido da Eq. (12) e obedece às regras contidas na Tabela 4. Onde *G* é grande e *P* é pequeno, sendo as funções pertinências dos conjuntos grandes e pequenos respectivamente. Onde NG é negativo grande, NM negativo médio, NP negativo pequeno, ZO zero, PP positivo pequeno, PM positivo médio e PG positivo grande.

O controlador PID fuzzy apresenta 7 termos linguísticos, onde são utilizadas 49 regras como pode ser observado na Tabela 3 onde relacionam-se os erros do sistema e os ganhos do controlador PID. A função de implicação adotada foi a de *Mamdani*, implementada com o operador mínimo, e o método de defuzzificação adotado foi o método do centro de gravidade, que assegura uma superfície de controle suave e contínua.

Tabela 3: Regras de sintonia para saídas  $K'_p$  and  $K'_d$  das entradas  $e(t)$  e  $\dot{e}(t)$ .

$e(t)$ \ $\dot{e}(t)$	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
NG	G/P						
NM	P/G	G/G	G/P	G/P	G/P	G/G	P/G
NP	P/G	P/G	G/G	G/P	G/G	P/G	P/G
ZO	P/G	P/G	P/G	G/P	P/g	P/G	P/G
PP	P/G	P/G	G/G	G/P	G/G	P/G	P/G
PM	P/G	G/G	G/P	G/P	G/P	G/G	P/G
PG	G/P	G/P	G/P	G/P	G/P	G/G	G/G

Tabela 4: Regras de ajuste para  $\alpha$  das entradas  $e(t)$  e  $\dot{e}(t)$ .

$e(t)$ \ $\dot{e}(t)$	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
NG	2	2	2	2	2	2	2
NM	3	3	2	2	2	3	3
NP	4	3	3	2	3	3	4
ZO	5	4	3	3	3	4	5
PP	4	3	3	2	3	3	4
PM	3	3	2	2	2	3	3
PG	2	2	2	2	2	2	2

As funções de pertinências do erro  $e(t)$  e da derivada do  $\dot{e}(t)$  são ilustradas na Figura 7. As funções de pertinências do erro  $e(t)$  e da derivada do  $\dot{e}(t)$  são triangulares, porque com esta topologia esses conjuntos de funções são bem representados.

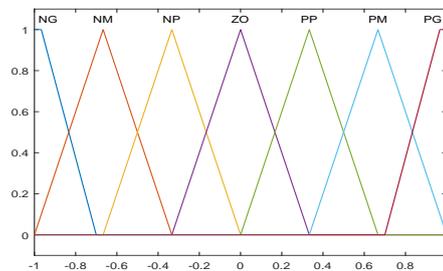


Figura 7: Funções de pertinências do erro  $e(t)$  e da derivada do erro  $\dot{e}(t)$ .

Na Figura 8 apresenta-se as funções de pertinências para os ganhos proporcional  $K'_p$  e derivativo  $K'_d$ , estas são Gaussianas, como não são lineares, esta é a melhor topologia para representá-las.

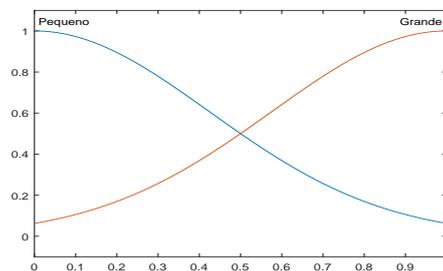


Figura 8: Funções de Pertinências dos ganhos proporcional  $K'_p$  e derivativo  $K'_d$ .

Na Figura 9 apresenta-se as funções de pertinências da variável  $\alpha$ , a forma mais apropriada para representá-las é do tipo *singleton*, uma vez que são constantes inteiras, de acordo com Table 4.

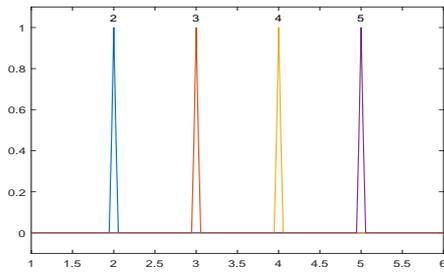


Figura 9: Função de pertinência da constante  $\alpha$ .

O comportamento dos ganhos  $K^{pid}$  em relação a sua dependência com o erro  $e(t)$  e sua derivada  $\dot{e}(t)$  está representado na Fig. 10.  $K^{pid}$  é uma função composta pelas variáveis  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , que são as saídas do projeto de lógica *fuzzy*, como  $K_i$  e  $K_d$  são dependentes de  $K_p$ , logo o comportamento da superfície é irregular, pois se alterar o valor de uma das variáveis, todas são afetadas.

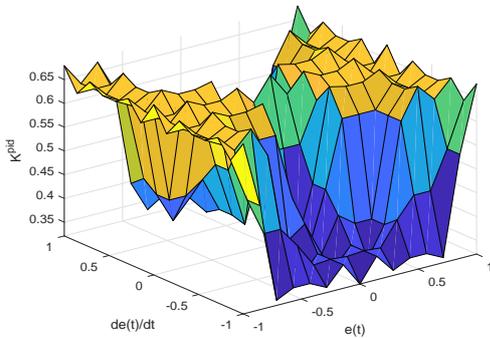


Figura 10: Comportamento de  $K^{pid} \times \dot{e}(t) \times e(t)$ .

## 5 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.

### 5.1 Setup da Simulação

O projeto do controlador PID-Fuzzy, consiste em um controlador PID sintonizado pelo segundo método de Ziegler-Nichols e em seguida, tendo seus ganhos ajustados *on-line* por regras *fuzzy* de acordo com a variação paramétrica da dinâmica da planta.

### 5.2 Simulador

Na Fig. 11 apresenta-se o simulador desenvolvido no *software* MATLAB/SIMULINK para o controlador PID da planta.

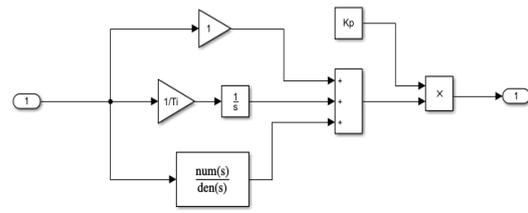


Figura 11: Simulador do controlador PID.

Na Fig. 12 apresenta-se o simulador desenvolvido no *software* MATLAB/SIMULINK para o controlador PID-Fuzzy da planta.

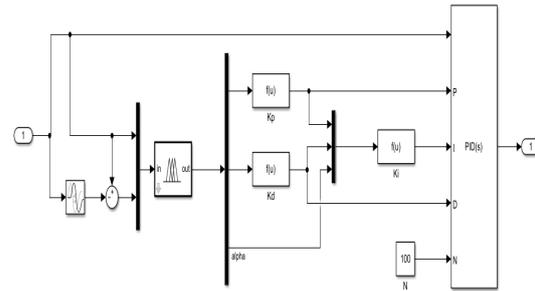


Figura 12: Simulador do controlador PID-Fuzzy

### 5.3 Avaliação dos Resultados Simulados

Os resultados são avaliados em uma planta industrial de grande porte, primeiro, analisa-se as plantas separadas e depois a planta composta por dois VV e uma EP.

Na Fig. 13, apresenta-se o comportamento da planta do VV1, nesta observa-se, que o controlador PID sintonizado por regras *fuzzy* obteve melhor desempenho, alcançando o valor de referência em menor tempo em comparação com o controlador PID-ZN e o controlador PI.

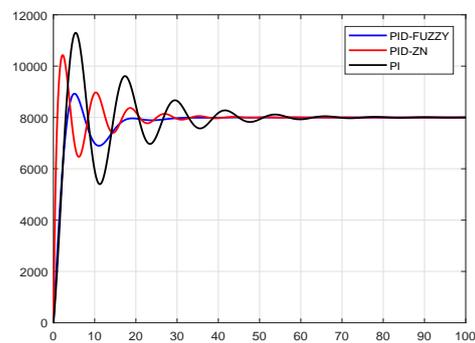


Figura 13: Resposta a degrau dos controladores PID-Fuzzy, PID-ZN e PI da planta VV1

Na Fig. 14, apresenta-se o comportamento da planta do VV2, nesta observa-se também, que o controlador PID sintonizado por regras *fuzzy*

obteve melhor desempenho, alcançando o valor de referência em menor tempo em comparação com os controladores PID-ZN e PI.

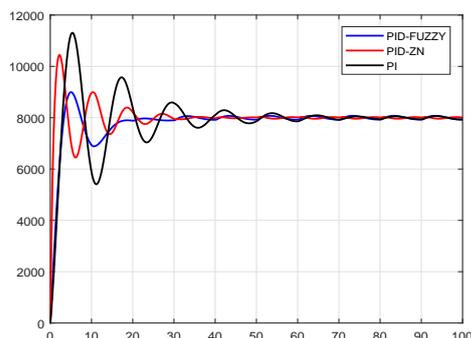


Figura 14: Resposta a degrau dos controladores PID-Fuzzy, PID-ZN e PI da planta VV2

A planta é composta de dois VV com capacidades de descarregamento de 8000t/h e uma EP com capacidade de estocagem de 16000t/h, 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 simultaneamente, de forma que, seja alcançada a referência de 16000t/h, conforme apresentado na Fig. 15, onde observa-se que os desempenhos dos controladores PID sintonizados por regras *fuzzy*, atuando simultaneamente foram mais eficientes do que os controladores PID-ZN e PI.

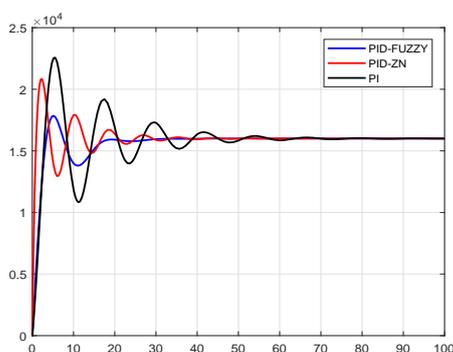


Figura 15: Resposta a degrau dos controladores PID-Fuzzy, PID-ZN e PI da planta VV1+VV2

#### 5.4 Rejeição às Perturbações

No processo analisado, são inserido sinais de perturbações de 50% do valor de referência para a avaliar a rejeição às perturbações nas variações paramétricas nas dinâmicas das plantas. Observa-se, que os controladores PID sintonizados por regras *fuzzy*, resistiram essas perturbações, de forma que,

os seus desempenhos foram satisfatórios, com pequenas oscilações, atendendo as especificações de projetos, mantendo-se em torno do ponto de referência.

Nas Figs. 16 e 17 avalia-se o comportamento das plantas do VV1 e do VV2 com os controladores PID-Fuzzy, PID-ZN e PI com um sinal de 50% de perturbação do valor de referência, nestas observa-se, que o desempenho dos controlador PID sintonizado por regras *fuzzy*, teve menores oscilações tendendo a seguir o valor de referência, sem perdas significativas das trajetórias alcançadas, enquanto que, os controladores PID-ZN e PI sofrem maiores oscilações, mas também tendem seguir à referência.

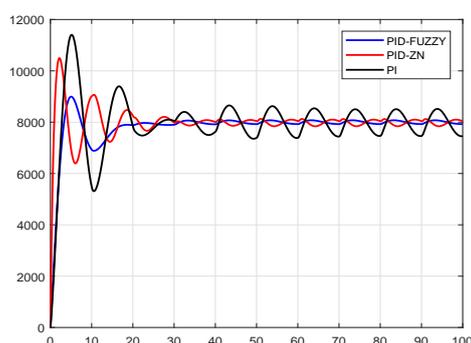


Figura 16: Resposta a degrau dos controladores PID-Fuzzy, PID-ZN e PI da planta VV1 com um sinal de 50% de perturbação no valor de referência.

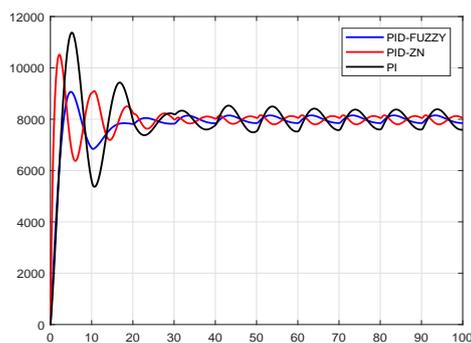


Figura 17: Resposta a degrau dos controladores PID-Fuzzy, PID-ZN e PI da planta VV2 com um sinal de 50% de perturbação no valor de referência.

Por fim, apresenta-se o comportamento da planta geral com um sinal de 50% de perturbação no valor de referência, onde as duas plantas VV1 e VV2 são analisadas simultaneamente, conforme Fig. 18, sendo que, o desempenho dos controladores PID-*fuzzy*, obtiveram melhores desempenhos,

semelhantes aos das plantas VV1 e VV2 analisadas separadas.

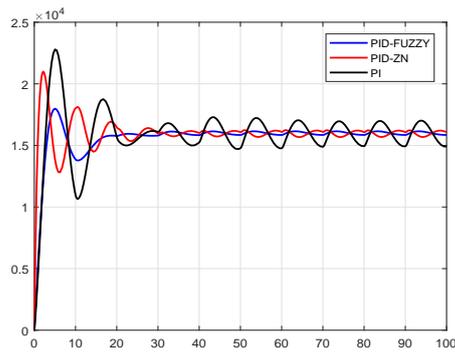


Figura 18: Resposta a degrau dos controladores PID-Fuzzy e PID-ZN da planta VV1 + VV2

## 6 Conclusão

De acordo com os resultados e análises dos experimentos simulados, observa-se que a sintonia do controlador PID com base em lógica *fuzzy*, para o controle de vazão de granéis em processos de descarregamento de vagões, obtém melhor desempenho em comparação com os controladores PID-ZN e PI sintonizado por tentativa e erro, tanto em respeito a seguir a referência com e sem sinal de perturbação na planta.

## Agradecimentos

Agradecemos à UFMA pelos ensinamentos técnicos/científicos e a empresa Vale S.A. por fornecer dados reais das plantas para os experimentos.

## Referências

- Åström, K. J. and Wittenmark, B. (2013). *Computer-controlled systems: theory and design*, Courier Corporation.
- Azar, A. T. and Vaidyanathan, S. (2015). *Chaos modeling and control systems design*, Vol. 581, Springer.
- Borjas, S. D. M. and Garcia, C. (2004). Modelagem de fcc usando métodos de identificação por predição de erro e por sub-espacos, *IEEE Latin America Transactions* 2(2): 108–113.
- Chen, C.-S. and Chen, H.-H. (2009). Robust adaptive neural-fuzzy-network control for the synchronization of uncertain chaotic systems, *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 10(3): 1466–1479.

Chen, D., Zhao, W., Sprott, J. C. and Ma, X. (2013). Application of takagi–sugeno fuzzy model to a class of chaotic synchronization and anti-synchronization, *Nonlinear Dynamics* 73(3): 1495–1505.

Cohen, G. (1953). Theoretical consideration of retarded control, *Trans. Asme* 75: 827–834.

de Moura, J. P. and da Fonseca Neto, J. V. (2016). Fuzzy controller in the cargo control wagons dump, *Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS), 2016 IEEE Conference on, IEEE*, pp. 10–16.

de Moura, J. P., de Oliveira Serra, G. L., da Fonseca, J. V. and Castelo, M. (n.d.). Logica fuzzy no controle de embarque de navios no terminal marítimo de ponta da madeira - sbai 2013.

Hwang, E.-J., Hyun, C.-H., Kim, E. and Park, M. (2009). Fuzzy model based adaptive synchronization of uncertain chaotic systems: robust tracking control approach, *Physics Letters A* 373(22): 1935–1939.

Lin, T.-C., Lee, T.-Y. and Balas, V. E. (2011). Adaptive fuzzy sliding mode control for synchronization of uncertain fractional order chaotic systems, *Chaos, Solitons & Fractals* 44(10): 791–801.

Ljung, L. (1999). Ljung l system identification theory for user. pdf, *PTR Prentice Hall Upper Saddle River NJ* 25: 475–476.

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.

Padula, F. and Visioli, A. (2011). Tuning rules for optimal pid and fractional-order pid controllers, *Journal of process control* 21(1): 69–81.

Parr, E. A. (1998). *Industrial control handbook*, Industrial Press Inc.

Rao, G. and Garnier, H. (2002). Numerical illustrations of the relevance of direct continuous-time model identification, *IFAC Proceedings Volumes* 35(1): 133–138.

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.

Ziegler, J. G. and Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers, *trans. ASME* 64(11).