

CONTROLADOR INTELIGENTE APLICADO EM UM SISTEMA DE PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE AGROQUÍMICOS USANDO INJEÇÃO DIRETA

KLEBER R. FELIZARDO*, HEITOR V. MERCALDI*, VILMA A. OLIVEIRA*, PAULO E. CRUVINEL†

**Universidade de São Paulo
Avenida Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590
São Carlos, SP, Brasil*

*†Embrapa Instrumentação
Rua XV de Novembro, 1452, CEP 13560-970
São Carlos, SP, Brasil*

Emails: klerfe@sc.usp.br, heitor@usp.br, vilma@sc.usp.br, paulo.cruvinel@embrapa.br

Abstract— The variable rate applications with direct injection systems is an important tool in precision agriculture to prevent from weed infestation. The injection system technology allow multiple chemical application and additionally reduces the toxicological and environmental risks associated with the carrier-chemical mix preparation and discard. This paper presents an implementation of a fuzzy gain scheduling of proportional-integral-derivative (PID) controller as well as its comparison with a PID controller to adjust the flow rate of the carrier-chemical mix. Practical results obtained with a test bench for sprayers have proven the effectiveness of the fuzzy gain scheduling of PID controller proposed.

Keywords— Precision agriculture, PID fuzzy control, direct injection, sprayer, variable-rate.

Resumo— A aplicação localizada de agroquímicos em taxas variadas usando sistemas de pulverização com injeção direta é uma importante ferramenta da agricultura de precisão no combate da infestação de plantas daninhas. Sistemas de injeção direta possibilitam o uso de diferentes agroquímicos em uma mesma aplicação, e adicionalmente reduzem os impactos toxicológico e ambiental relacionados com o preparo e descarte da mistura de agroquímico e água. Neste artigo é apresentado uma implementação de um controlador adaptativo do tipo proporcional-integral-derivativo (PID) fuzzy por escalonamento de ganho bem como sua comparação a um controlador PID para ajustar a vazão da mistura água-agroquímico. Resultados práticos obtidos através de uma bancada de testes para pulverizadores comprovaram a eficiência do controlador PID fuzzy proposto.

Palavras-chave— Agricultura de precisão, controle PID fuzzy, injeção direta, pulverizador, taxa variada.

1 Introdução

A aplicação localizada de agroquímicos, realizada em taxa variável pela detecção instantânea dos alvos (por exemplo, plantas daninhas) através do uso de sensores ou câmeras digitais ou por mapas de prescrição, pode reduzir o desperdício de agroquímicos e a agressão ao meio ambiente, proporcionando uma produção mais eficiente de alimentos em grande escala e aumentando a produtividade agrícola. Na aplicação baseada em mapas, é necessário o mapeamento das infestações das plantas daninhas em uma etapa anterior a pulverização, para geração dos mapas de prescrição contendo os valores das doses do agroquímico para cada local do campo. No outro tipo de aplicação, a pulverização é feita em tempo real, ou seja, instantes após a identificação das plantas daninhas (Baio and Antuniassi, 2011).

As aplicações em taxa variada podem ser obtidas por mudanças do volume aplicado, mantendo-se a concentração da calda constante, ou através de variações na concentração (dose) do agroquímico na calda, ao longo da pulverização. Esse último método de variação é utilizado nos pulverizadores mais avançados que utilizam sistemas de injeção direta (Antuniassi and Júnior, 2000).

A principal característica dos sistemas de in-

jeção direta está relacionada ao armazenamento do diluente (água) e do agroquímico em recipientes separados. A mistura é realizada somente no momento da aplicação, através da injeção do agroquímico na tubulação que leva a calda aos bicos do pulverizador. Nesses sistemas, a quantidade de agroquímico injetado pode ser realizada, entre outras maneiras, através do controle da rotação das bombas injetoras de pistões ou peristálticas, as quais possuem rotação proporcional a vazão. As principais vantagens do sistema de injeção direta são a redução dos riscos envolvidos no preparo e descarte da calda e a possibilidade de aplicar mais de um tipo de agroquímico numa mesma aplicação (Baio and Antuniassi, 2011).

Os controladores eletrônicos utilizados em sistemas de pulverização com injeção direta devem possuir como característica de desempenho um erro de regime inferior a 5%. Adicionalmente, os valores instantâneos das vazões não podem ultrapassar 10% do valor de referência, devendo estes retornarem aos valores desejados em uma margem de 5 s após o pulverizador ter sofrido variações nas condições de trabalho, causados por alterações na velocidade do pulverizador ou mudanças nas taxas de aplicação (Rietz et al., 1997).

Os controladores eletrônicos, em sua configuração básica, são conectados a sensores (va-

ção, rotação e de velocidade) e atuadores (válvula de controle e bomba de injeção) para regulação das vazões da calda e do agroquímico. Os tipos mais simples de controladores em malha fechada empregados em sistemas de pulverização com injeção direta baseiam-se na lei de controle PID (Shi et al., 2009; Aiwu et al., 2010; Aissoui et al., 2011). Entretanto, um controlador PID pode não atingir um desempenho satisfatório ou necessitar de frequentes ajustes manuais devido as características não-lineares do processo a ser controlado (Chen and Pham, 2001). As válvulas de controle utilizadas em sistemas de pulverização são não-lineares (zona-morta, saturação), assim como o comportamento dinâmico da vazão da calda e da pressão de pulverização (Steward and Humburg, 2000; Felizardo et al., 2012).

Controladores PID fuzzy por escalonamento de ganho, que consiste em um controlador PID e um sistema fuzzy, responsável pela alteração dos ganhos dos parâmetros desse controlador, têm sido aplicados para melhorar o desempenho dos controladores PID utilizados em processos não-lineares (Chen and Pham, 2001).

Este trabalho apresenta a implementação de um controlador adaptativo do tipo PID fuzzy por escalonamento de ganho, bem como sua comparação a um controlador PID para controle da vazão da calda de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta.

2 Descrição do sistema de pulverização com injeção direta

O sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada desenvolvido neste trabalho (Figura 1) faz parte de uma bancada automatizada instalada em uma infraestrutura compartilhada entre a Embrapa Instrumentação e o Laboratório de Controle da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (Cruvinel et al., 2011). Esta bancada permite, dentre outras coisas, desenvolver novos tipos de controladores para sistemas de pulverização e por isso sua automação foi feita por um sistema embarcado baseado em um controlador programável para automação (PAC), modelo cRIO-9073, da National Instruments.

O pulverizador trabalha com taxa de aplicação variada e emprega injeção direta de agroquímico. O agroquímico é injetado na linha de sucção da bomba de pulverização (Figura 1) com o auxílio uma bomba de injeção do tipo pistão acionada por um motor CC de 12 V. A vazão do agroquímico q_h é proporcional a velocidade angular ω_h do motor CC. Um controlador proporcional-integral (PI) regula ω_h através da tensão média aplicada ao motor CC.

A bomba de pulverização também é do tipo

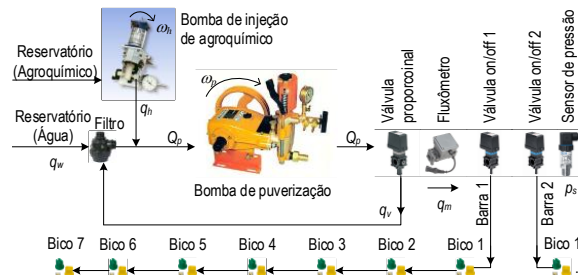


Figura 1: Ilustração do sistema de pulverização com injeção direta para aplicação de agroquímicos a taxa variada.

pistão acionado por um motor de indução trifásico e sua vazão Q_p é proporcional a velocidade angular ω_p do motor de indução. O ajuste de ω_p é feito por um inversor de frequência e seu valor foi ajustado para manter a vazão da bomba em sua capacidade máxima.

Uma válvula de controle do tipo proporcional é acionada por um motor CC de 12 V e regula a vazão da mistura q_m , a qual é lida por um fluxômetro eletromagnético. O motor CC dessa válvula é acionado por uma ponte H comandada por um sinal do tipo PWM com frequência de 500 Hz. O ciclo de trabalho desse sinal PWM, denotado por d_v , determina a ação de abertura, fechamento ou parada da válvula, e seu valor é ajustado pelo controlador adaptativo do tipo PID fuzzy por escalonamento de ganho.

As válvulas de seção de barra são do tipo on/off acionadas por motores CC de 12 V e são utilizadas para o fechamento das barras de pulverização 1 e 2. Nessas barras estão instalados os bicos de pulverização, com pontas de jato plano, com leque de 110° , modelo 11005, e um sensor de pressão para monitoramento da pressão de pulverização p_s . Neste trabalho as válvulas de seção de barra permaneceram sempre abertas.

O PAC cRIO-9073 (Figura 2) possui um processador industrial de 266 MHz gerenciado por um sistema operacional de tempo real, um chip FPGA (Field-Programmable Gate Array) de 2 milhões de portas programável pelo usuário e um chassi reconfigurável que aloja até oito módulos de entrada e/ou saída (E/S). O chip FPGA é conectado ao processador através de um barramento PCI de alta velocidade e cada módulo de E/S é conectado diretamente ao chip FPGA.

Para programar o cRIO-9073, utilizam-se os softwares LabVIEW PC, LabVIEW RT (Real-Time) e LabVIEW FPGA. O processador do cRIO-9073 executa deterministicamente as aplicações criadas com o software LabVIEW RT e o chip FPGA executa de forma simultânea as aplicações criadas com o software LabVIEW FPGA. Neste projeto foi necessário desenvolver três programas (VIs). Dois programas foram criados no LabVIEW RT e LabVIEW FPGA os quais rodam

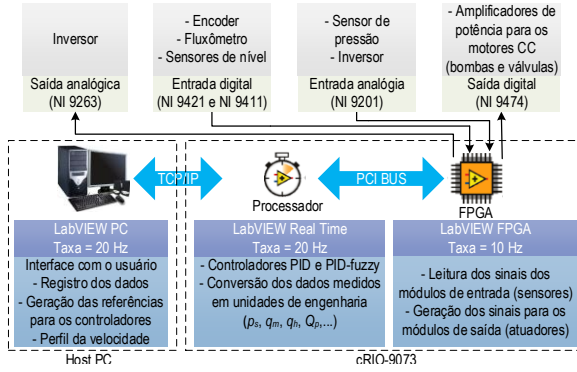


Figura 2: Arquitetura usada para o desenvolvimento da automação da bancada de pulverização.

diretamente no PAC. O outro programa foi criado no LabVIEW PC o qual é executado no PC Host (computador pessoal). As aplicações criadas nestes softwares estão descritas na Figura 2.

3 Implementação dos controladores

Neste trabalho são implementados e comparados dois controladores: um controlador PID convencional e um controlador PID fuzzy por escalonamento de ganho, que ajusta os parâmetros do PID através de um sistema fuzzy. Os controladores implementados para funcionamento no sistema de tempo real do cRIO-9073 foram desenvolvidos com o auxílio da ferramenta PID and Fuzzy Logic Toolkit do LabVIEW RT. A referência da vazão da calda Q_{mr} , em ℓ/min , para os controladores implementados é dada em função das seguintes variáveis (Boller and Raetano, 2011):

$$Q_{mr} = \frac{D_{mr} v_p n e_b}{60000} \quad (1)$$

sendo D_{mr} (ℓ/ha) a taxa de aplicação desejada para a calda, v_p (km/h) a velocidade do pulverizador no campo, e_b (cm) a distância entre os bicos de pulverização e n o número de bicos ativos na barra de pulverização.

3.1 Controlador PID fuzzy com escalonamento de ganho

Um controlador PID fuzzy com escalonamento de ganho foi proposto para regulação da vazão da calda q_m . O controlador implementado é apresentado no diagrama em blocos da Figura 3.

O bloco de sintonia fuzzy, composto por quatro estágios detalhados na Figura 4, tem como objetivo ajustar os valores dos parâmetros do controlador PID para melhorar o desempenho da malha de controle. A escolha dos estágios 1 a 3 seguem as propostas apresentadas por (Pu and Zhang, 2009; Bae et al., 2011).

Estágio 1: é o estágio de entrada, responsável por

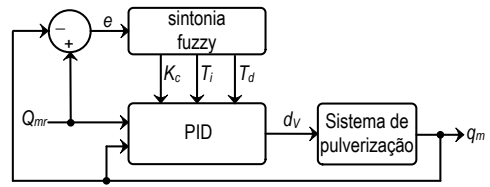


Figura 3: Diagrama em blocos do controlador PID fuzzy adaptativo implementado.

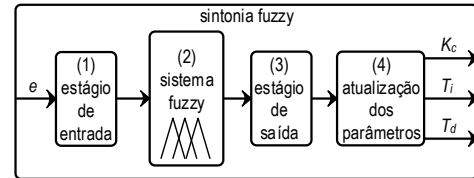


Figura 4: Diagrama em blocos do sistema de sintonia fuzzy.

ajustar os valores de entrada para o sistema fuzzy. Nesse estágio são calculados o erro E e a variação do erro EC , variáveis de entrada do sistema fuzzy, como segue:

$$E = G_E(Q_{mr} - q_m) = G_E e(kT) \quad (2)$$

$$EC = G_{EC} \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} = G_{EC} \Delta e(kT) \quad (3)$$

onde G_E e G_{EC} são as constantes de ganho e $T = 50 \text{ ms}$ é o período de amostragem.

Estágio 2: é o estágio onde ocorre a inferência para a sintonia dos parâmetros. O sistema fuzzy é implementado com duas entradas e três saídas conforme ilustra a Figura 5.

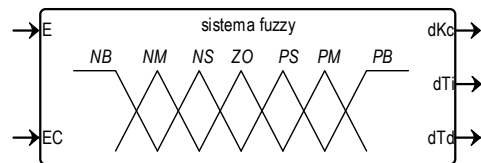


Figura 5: Representação do sistema fuzzy implementado.

A cada iteração são calculados os valores das saídas dK_c , dT_i e dT_d baseado no erro E e sua variação EC . Cada variável, de entrada ou saída, é representada por um conjunto fuzzy composto por sete termos linguísticos: negativo grande (NB), negativo médio (NM), negativo pequeno (NS), zero (ZO), positivo pequeno (PS), positivo médio (PM) e positivo grande (PB). Na Tabela 1 são mostrados os conjuntos fuzzy que representam as variáveis de entrada e saída, seu universo de discurso \mathcal{U} e as variáveis linguísticas pertencentes a cada conjunto. A seguir são apresentadas em (4) a (6) as funções de pertinência que representam

Tabela 1: Conjuntos fuzzy de entrada e saída.

	Nome	\mathcal{U}	Funções de pertinência
variáveis de entrada	E	(-41; 41)	{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}
	EC	(-150; 150)	{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}
variáveis de saída	dK_c	(-1; 1)	{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}
	dT_i	(-1; 1)	{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}
	dT_d	(-1; 1)	{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}

as variáveis de entrada E e EC e as de saída dK_c , dT_i e dT_d .

$$E = \begin{cases} NB, & \mu_{\Pi}(x; -42; -42; -10; -7) \\ NM, & \mu_{\wedge}(x; -10; -7; -4) \\ NS, & \mu_{\wedge}(x; -7; -4; -2) \\ ZO, & \mu_{\wedge}(x; -4; 0; 4) \\ PS, & \mu_{\wedge}(x; 2; 4; 7) \\ PM, & \mu_{\wedge}(x; 4; 7; 10) \\ PB, & \mu_{\Pi}(x; 7; 10; 42; 42) \end{cases} \quad (4)$$

$$EC = \begin{cases} NB, & \mu_{\Pi}(x; -150; -150; -11; -7) \\ NM, & \mu_{\wedge}(x; -11; -7; -3) \\ NS, & \mu_{\wedge}(x; -5; -3; -1) \\ ZO, & \mu_{\wedge}(x; -3; 0; 3) \\ PS, & \mu_{\wedge}(x; 1; 3; 5) \\ PM, & \mu_{\wedge}(x; 3; 7; 11) \\ PB, & \mu_{\Pi}(x; 7; 11; 150; 150) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{matrix} dK_c \\ dT_i \\ dT_d \end{matrix} = \begin{cases} NB, & \mu_{\wedge}(x; -2; -1; -0, 66) \\ NM, & \mu_{\wedge}(x; -1; -0, 66; -0, 33) \\ NS, & \mu_{\wedge}(x; -0, 66; -0, 33; 0) \\ ZO, & \mu_{\wedge}(x; -0, 33; 0; 0, 33) \\ PS, & \mu_{\wedge}(x; 0; 0, 33; 0, 66) \\ PM, & \mu_{\wedge}(x; 0, 33; 0, 66; 1) \\ PB, & \mu_{\wedge}(x; 0, 66; 1; 2) \end{cases} \quad (6)$$

Com as variáveis de entrada e saída definidas é elaborado o conjunto de regras (Tabela 2) que relacionam as entradas com as saídas, onde é utilizado o conectivo AND (*Minimum*). Para cada par de valores de E e EC , o sistema fuzzy determina o valor das saídas através do método de defuzzificação centro de área CoA . As variáveis de saída do sistema fuzzy podem ser representadas com uma função das entradas e das regras:

$$dK_c = F_1(E, EC), \quad (7)$$

$$dT_i = F_2(E, EC), \quad (8)$$

$$dT_d = F_3(E, EC) \quad (9)$$

onde F_1 a F_3 são funções que mapeiam as variáveis de saída, e além disto, as saídas só são válidas ($dK_c \neq 0$, $dT_i \neq 0$ e $dT_d \neq 0$) se os valores das variáveis de entrada estiverem representadas em seus respectivos universos de discurso $E \in \mathcal{U}_E$ e $EC \in \mathcal{U}_{EC}$. Essas superfícies são definidas no intervalo $(-1, 1)$ e os valores de variação dos parâmetros do controlador PID são obtidos no estágio

Tabela 2: Base de regras.

EC	E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	K_c	NB	PM	ZO	NB	ZO	NS	PB
NB	T_i	ZO	NM	ZO	ZO	ZO	PB	NB
	T_d	ZO	NM	ZO	ZO	ZO	NM	PB
NM	K_c	PB	PM	ZO	NM	ZO	NS	PB
	T_i	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PB	NB
NS	T_d	PB	NM	ZO	ZO	ZO	NM	PB
	K_c	PB	PM	ZO	PB	ZO	NS	PB
ZO	T_i	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PB	NB
	T_d	PB	NM	ZO	ZO	ZO	NM	PB
PS	K_c	PB	PM	ZO	PB	ZO	NS	PB
	T_i	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PB	NB
PM	T_d	PB	NM	ZO	ZO	ZO	NM	PB
	K_c	PB	PM	ZO	NM	ZO	NS	PB
PB	T_i	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PB	NB
	T_d	PB	NM	ZO	ZO	ZO	NM	PB

seguinte, pela multiplicação das superfícies pelos respectivos valores escalares dos ganhos de saída.

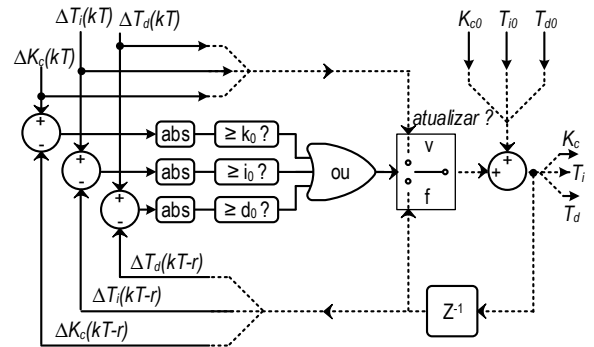


Figura 6: Esquema de avaliação e atualização dos parâmetros do controlador PID.

Estágio 3: é o estágio onde são calculados os valores da variação dos parâmetros do controlador PID. A partir das variáveis de saída do sistema fuzzy a variação dos parâmetros do controlador

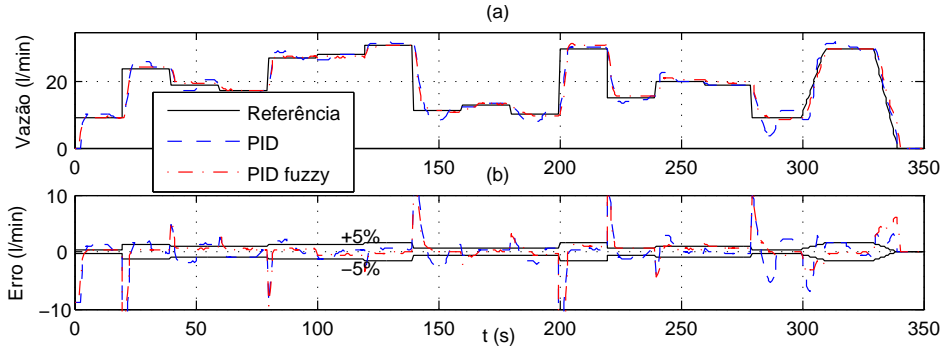


Figura 7: Respostas dos controladores PID e PID fuzzy.

PID é dada por:

$$\Delta K_c(kT) = G_{KC} dK_c, \quad (10)$$

$$\Delta T_i(kT) = G_{TI} dT_i, \quad (11)$$

$$\Delta T_d(kT) = G_{TD} dT_d, \quad (12)$$

onde $G_{KC} = 14$, $G_{TI} = 3,5 \cdot 10^{-2}$ e $G_{TD} = 8 \cdot 10^{-3}$ são ganhos do estágio e devem ser no máximo os valores ajustados no PID, a fim de evitar a instabilidade da malha de controle.

Estágio 4: é o estágio onde é verificado se os valores calculados do estágio anterior serão atualizados no controlador. A variação dos parâmetros K_c , T_i ou T_d durante a execução da rotina do PID acarreta na reinicialização do integrador, levando o controlador a atuar somente como PD. Para contornar esse problema é desenvolvido um algoritmo, representado através do esquema na Figura 6, que utiliza limiares para definir se atualiza ou não os parâmetros do controlador.

O algoritmo recebe como entradas os valores das variáveis de saída do sistema fuzzy ($\Delta K_c(kT)$, $\Delta T_i(kT)$ e $\Delta T_d(kT)$), os valores dos ganhos aplicados as variáveis de saída do Estágio 3 (G_{KC} , G_{TI} e G_{TD}) e os valores dos parâmetros ajustados para o controlador PID (K_{c0} , T_{i0} e T_{d0}) e verifica, para cada variável, se a diferença do valor absoluto entre as variáveis de saída são maiores que os limiares ($k0 = 0,1G_{KC}$, $i0 = 0,1G_{TI}$ e $d0 = 0,1G_{TD}$) e caso afirmativo, atualiza os valores dos parâmetros do controlador.

3.2 Controlador PID

Um controlador discreto do tipo PID foi utilizado para regulação da vazão da calda q_m . Os parâmetros iniciais deste controlador, denotados pelo ganho proporcional K_{c1} , pelo tempo de integração T_{i1} e pelo tempo de derivação T_{d1} , foram obtidos a partir de ensaios na bancada de pulverização, utilizando-se o segundo método de Ziegler-Nichols (Ogata, 2003).

Inicialmente foi implementado um controlador proporcional. A saída q_m , para um ganho

crítico $K_{cr} = 20$, apresentou oscilações correspondente a um período crítico de $T_{cr} = 3,2$. A partir de K_{cr} e T_{cr} foram encontrados os valores iniciais dos parâmetros K_{c1} , T_{i1} e T_{d1} . A partir dos valores iniciais obtidos pelo método, foi feito o ajuste manual dos parâmetros diretamente na bancada de pulverização e assim foram obtidos os valores dos parâmetros para o controlador PID do sistema de pulverização: $K_{c1} = 24$ e $T_{i1} = 0,044$ e $T_{d1} = 0,0067$, com T_{i1} e T_{d1} dado em minutos.

4 Resultados

O objetivo do ensaio apresentado a seguir é avaliar o desempenho dos controladores implementados, os quais são avaliados através do erro instantâneo da vazão q_m no seguimento da trajetória de referência dada em (1). São analisados portanto o erro absoluto integral (IAE), dado em ℓ , e a norma \mathcal{L}^2 , dada em ℓ/min , que mede a raiz quadrática média do erro (Whitcomb et al., 1993; Oviedo et al., 2006).

É definida uma referência para a vazão da calda Q_{mr} , conforme mostra a Figura 7(a). O formato da curva utilizada como referência para os controladores foi elaborado para simular duas situações distintas: (i) mudanças abruptas na taxa de aplicação D_{mr} devido a mudança do grau de infestação por plantas invasoras e (ii) variação na velocidade v_p do pulverizador.

Os resultados experimentais mostrados na Figura 7 indicam que o controlador PID fuzzy apresentou um tempo de resposta mais rápido com menores sobressinais, bem como menores erros de vazão em regime. No geral, os gráficos da Figura 7 indicam um melhor desempenho do PID fuzzy, o que pode ser confirmado pelos índices de desempenho mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Desempenho dos controladores.

Controlador	IAE	\mathcal{L}^2
PID	9,060	2,990
PID-Fuzzy	7,280	2,880
Melhora (%)	25,00	4,00

5 Conclusões

Os resultados experimentais mostram que para regular a vazão da calda, o controlador PID fuzzy por escalonamento de ganho apresentou desempenho superior ao controlador PID convencional. Com relação ao erro total de aplicação houve uma melhora de 25% e quanto ao erro quadrático médio a melhora de desempenho é de 4% na faixa de operação de 10 a 32 l/min . Desta forma, conclui-se que o controlador PID fuzzy por escalonamento de ganho apresenta potencial aplicação para regular a vazão em sistemas de pulverização.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Embrapa e a EESC-USP pela parceria no âmbito da Rede em Agricultura de Precisão (Macro Programa 1, Processo: 01.09.01.002.01) e ao CNPq (Processos: 143452/2008-8, 479306/2008-7 e 304985/2009-0).

Referências

- Aissaoui, A. E., Lebeau, F., Elbahir, L., Destain, M.-F. and Houmy, K. (2011). A feasibility study of developing direct injection spraying technology for small scale farms, *Synergy 2011*, Godollo, Hungary, pp. 9–15.
- Aiwu, C., Ailin, L., Zhizhuang, L., Wenzhao, Z. and Xinling, T. (2010). Design of flow control system on sprayer, *International conference on computer application and system modeling*, Taiyuan, pp. 577–580.
- Antuniassi, U. R. and Júnior, C. D. G. (2000). Aplicação localizada de produtos fitossanitários, *Simpósio de Agricultura de Precisão*, Viçosa, pp. 181–202.
- Bae, K., Park, J. W., Kim, C.-H. and Han, H.-S. (2011). Fuzzy gain scheduling for magnetic levitation control, *The 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon - Korea, pp. SOCP-01.
- Baio, F. H. R. and Antuniassi, U. R. (2011). Sistemas de controle eletrônico e navegação para pulverizadores, in U. R. Antuniassi and W. Boller (eds), *Tecnologia de Aplicação para Culturas Anuais*, Aldeia Norte, Passo Fundo.
- Boller, W. and Raetano, C. G. (2011). Bicos e pontas de pulverização de energia hidráulica, regulagens e calibração de pulverizadores de barras, in U. R. Antuniassi and W. Boller (eds), *Tecnologia de Aplicação para Culturas Anuais*, Aldeia Norte, Passo Fundo.
- Chen, G. and Pham, T. T. (2001). *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Cruvinel, P. E., de Oliveira, V. A., Felizardo, K. R. and Mercaldi, H. V. (2011). Bancada automatizada para ensaios e desenvolvimento de pulverizadores de agrotóxicos, aplicadores de fertilizantes líquidos e maturadores em culturas agrícolas sob manejo baseado em agricultura de precisão, *Agricultura de Precisão: um Novo Olhar*, Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, pp. 96–100.
- Felizardo, K. R., Mercaldi, H. V., Oliveira, V. A. and Cruvinel, P. E. (2012). Implementação de um controlador preditivo para uso em um sistema de injeção direta de herbicida, *XIX Congresso Brasileiro de Automática*, Campina Grande, pp. 3571–3576.
- Ogata, K. (2003). *Engenharia de Controle Moderno*, 4 edn, Prentice Hall Brasil, São Paulo, Brasil.
- Oviedo, J., Boelen, T. and van Overschee, P. (2006). Robust advanced PID control RAPID: PID tuning based on engineering specifications, *Control Systems, IEEE* **26**(1): 15–19.
- Pu, L. and Zhang, X. (2009). An intelligent fuzzy-pid control system for high-speed solenoid valve, *Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*, IEEE, Kaohsiung, pp. 504–507.
- Rietz, S., Pályi, B., Ganzelmeier, H. and László, A. (1997). Performance of electronic controls for field sprayers, *Journal of Agricultural Engineering Research* **68**(4): 399 – 407.
- Shi, Y., Liang, A., Yuan, H., Zhang, C. and Li, J. (2009). Modeling and simulation for a variable sprayerrate system, in D. Li and C. Zhao (eds), *Computer and Computing Technologies in Agriculture II, Volume 1*, Vol. 293 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Springer US, Boston, pp. 573–584.
- Steward, B. L. and Humburg, D. S. (2000). Modeling the raven SCS-700 chemical injection system with carrier control with sprayer simulation, *Transactions of the ASAE* **43**(2): 231–245.
- Whitcomb, L., Rizzi, A. and Koditschek, D. (1993). Comparative experiments with a new adaptive controller for robot arms, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **9**(1): 59–70.