

# Controladores e algoritmos computacionais embarcados para agregação de qualidade no uso de pulverizadores terrestres em aplicação localizada

*Embedded controllers and algorithms in boom sprayers for quality aggregation in localized applications*

Heitor Vinicius Mercaldi<sup>1</sup>, Deniver Reinke Schutz<sup>2</sup>, Elmer Alexis Gamboa Peñaloza<sup>3</sup>, Vilma Alves de Oliveira<sup>4</sup>, Paulo Estevão Cruvinel<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Doutor, Universidade Federal de São Carlos, Embrapa Instrumentação, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: heitor@ufscar.br

<sup>2</sup> Mestre, Universidade de São Paulo, Embrapa Instrumentação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: deniver@usp.br

<sup>3</sup> Doutor, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Embrapa Instrumentação, Universidade de São Paulo, Brasil, e-mail: elmeralexis@gmail.com

<sup>4</sup> Profa Titular, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: voliveira@usp.br

<sup>5</sup> Doutor, Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: paulo.cruvinel@embrapa.br

## RESUMO


O uso de tecnologias avançadas, como as utilizadas na agricultura de precisão, tem aumentado a produtividade e reduzido os custos de produção. Nesse sentido, o desempenho das máquinas agrícolas, bem como a qualidade da aplicação de agrotóxicos, vem melhorando a eficiência no controle de pragas. Neste capítulo, é apresentado um conjunto de controladores eletrônicos avançados para pulverizadores que operam em taxa variada, que foram desenvolvidos no Laboratório de Pulverização Agrícola de Precisão, administrado em parceria estabelecida entre a Embrapa Instrumentação e o Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de São Paulo. Nesse contexto, são apresentados não apenas os métodos empregados, mas também resultados comparativos da implementação de três diferentes controladores eletrônicos para pulverizadores, que envolvem as leis de controle para regulação de pressão e vazão para melhorar a qualidade da aplicação. Além disso, são apresentados soft-sensores capazes de prever descritores de qualidade de pulverização, bem como auxiliar na definição de condições adequadas para operação em tempo real. Adicionalmente, são apresentadas análises comparativas para controladores eletrônicos baseados em diferentes configurações, ou seja, controlador proporcional integral diferencial (PID), controlador preditivo generalizado (GPC) e controlador preditivo generalizado com lógica difusa (GPC-fuzzy). Os resultados experimentais demonstram as vantagens na utilização de técnicas de controle mais avançadas. A implementação dos controladores utilizando microcontroladores avançados baseados em um conjunto reduzido de instruções (ARM) demonstra a viabilidade da implementação embarcada para tomada de decisão em tempo real. Este capítulo apresenta resultados completos e validados.

**Palavras-chave:** controladores inteligentes; pulverizadores; agrotóxicos; controle de pragas; soft-sensor; erro de aplicação.

## ABSTRACT

The use of advanced technologies, such as those employed in precision agriculture, has increased productivity and reduced production costs. In this sense, the performance of agricultural machines, as well as the application quality of pesticides, has been improving pest control efficiency. In this Chapter, a set of advanced electronic controllers for sprayers is presented, which was developed at the Precision Agricultural Spraying Laboratory, managed by the

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000085>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.



Embrapa Instrumentation and the Department of Electrical and Computer Engineering of the University of São Paulo. In this context, not only methodological designs but also comparative results from the implementation of three different electronic controllers for sprayers are presented, which involve the control laws for the regulation of pressure and flow to improve application quality. Furthermore, soft-sensors capable of predicting spray quality descriptors, as well as helping to define suitable conditions for real-time operation, are presented. Additionally, design and comparative analysis for electronic controllers based on the Proportional-Integral-Differential (PID), Generalized Predictive Controller (GPC) and GPC-Fuzzy are presented. The experimental results showed advantages in using such electronic controllers, which have been implemented using the Advanced RISC Machine (ARM) microcontrollers, i.e., to make their embedded intelligent algorithms viable for real time decision making. This Chapter presents complete and validated results.

**Keywords:** Intelligent controllers; sprayers; pesticides; pest control; soft-sensor; application error.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sensores atuadores e controladores são dispositivos utilizados para automatizar processos. Têm por objetivo melhorar a produtividade de um determinado sistema e aumentar sua qualidade, minimizando riscos e oferecendo controle sobre sua operação, o que envolve a segurança de processos. De fato, o controle é o ato de comandar, dirigir, ordenar, ou mesmo corrigir no tempo o valor ou faixa de valores de uma variável de um determinado sistema.

Na prática, os processos a serem controlados em geral apresentam um comportamento dinâmico, referindo esse conceito a uma situação ou estado que é dependente do tempo. O estudo de um sistema dinâmico pode ser entendido como sendo o estudo do comportamento, em função do tempo, de grandezas relacionadas com uma parte de seu universo de atuação. Nesse sentido, o uso de um controlador de processos possibilita gerar um sinal ou ação de controle que leva a variável do processo para uma dada referência, assim como deve ser capaz de lidar com perturbações (Oliveira et al., 2017).

Os controladores utilizados em pulverizadores, tanto para aplicações convencionais como para as aplicações em taxa variada, podem utilizar ou não informações de realimentação sobre o volume aplicado, o qual é dependente das informações da pressão ou de vazão (Cruvinel et al., 2016). O resultado das operações de aplicação pode ser analisado pela deposição, cobertura, deriva e eficácia do controle desejado (Christofolletti, 1999). Porém, tanto fatores internos ao pulverizador como externos interferem no processo de deposição dos agrotóxicos no alvo, podendo causar erros de aplicação. O tamanho de gota é um dos principais descritores que caracterizam a eficiência de uma aplicação. Para gotas pequenas, obtém-se

maior cobertura superficial e melhor uniformidade de distribuição da calda, mas o efeito de deriva pode ser ampliado, o que também inclui a potencialização do efeito de evaporação. Por outro lado, as gotas grandes apresentam maior potencial para escorrer da superfície da folha, antes mesmo de o produto ser absorvido no alvo desejado (Suzumura; Cruvinel, 2005).

A aplicação de agrotóxicos, quando inserido no conceito de agricultura de precisão, deve considerar fatores relacionados à própria máquina e sua precisão, bem como fatores externos. Shiratsuchi e Fontes (2002) definem a aplicação de agrotóxicos agrícolas como sendo a sobreposição de um determinado alvo por um produto biologicamente ativo, em quantidade adequada, de forma econômica e com riscos mínimos de contaminação. Nesse sentido, a tecnologia de aplicação de agrotóxicos compreende o uso de conhecimentos científicos, técnicas e métodos para a precisa colocação do produto biologicamente ativo no alvo de interesse (Cunha; Carvalho, 2005). Adicionalmente aos aspectos mencionados, o custo elevado dos agrotóxicos, que pode chegar a 30% do custo total de produção em uma lavoura, há necessidade de se buscar o seu uso racional e a melhoria da qualidade de aplicação, o que inclui prioritariamente a minimização de erros e o uso das boas práticas para que se possa atuar considerando ganhos de eficácia, assim como de eficiência no controle das pragas em uma área de lavoura.

Nesse contexto, a avaliação dos depósitos de gotas sobre alvos tem se configurado como um dos métodos mais representativos para se avaliar a qualidade da aplicação de agrotóxicos para o controle fitossanitário (Yasin, 2012; Leadbeater, 2015). Se junta a esse método a aplicação de soft-sensores, os quais para a área em questão emergiram recentemente, com tra-

balhos originais realizados no Brasil (Penaloza et al., 2017; 2021). O uso de soft-sensores viabiliza não somente a caracterização das condições de operação como também a escolha dos descritores de qualidade da pulverização. Eles possibilitam estimar a qualidade de uma aplicação tomando por base parâmetros envolvidos no espectro de gotas decorrentes de uma aplicação e um segundo arranjo relacionado à definição dos parâmetros de regulagem do pulverizador, de forma a se estabelecer a priori condições de regulagem de pulverizadores para atingir a qualidade de aplicação desejada.

Para processos de pulverização que considerem a aplicação em taxa variada, há necessidade de se controlar o volume da calda pulverizada em função da localização espacial em que se encontra o pulverizador na área da lavoura, vindo a ser importante considerar embarcar os controles eletrônicos junto aos sistemas hidráulicos que compõem os pulverizadores.

O controle de pragas agrícolas é entendido como uma tarefa de alta complexidade, uma vez que envolve ações sobre a eficácia dos pulverizadores (Pereira, 2006), garantia da qualidade da aplicação (Matthews, 1992), avaliação de fatores inerentes às características da máquina que transporta o pulverizador (Bonadio et al., 2015; Cruvinel et al., 2020) e de seu operador (Sutherland et al., 1990), fatores climáticos (Thistle et al., 1998) e fatores inerentes aos insumos que trazem os ingredientes ativos (Chaim, 2009) e seus registros no Agrofit (Mapa, 2022). Logo, a qualidade na aplicação é atrelada às características operacionais dos pulverizadores. Segundo Senar (2018), os principais parâmetros operacionais que influenciam o processo de operação são: tamanho de gota, volume de aplicação (taxa de aplicação), vazão, pressão, velocidade de trabalho, faixa de aplicação e altura da barra do pulverizador.

Os avanços na tecnologia de aplicação têm trazido avanços para a melhoria do processo, mas ainda há muito para ser realizado para se garantir melhor rendimento, uso racional desses insumos e menores custos operacionais (Dornelles et al., 2009). O cuidado com a lavoura requer proteção contra pragas e doenças, assim como a manutenção de uma adequada fertilidade do solo. De fato, existe uma grande variedade de tipos de pulverizadores que são disponíveis tanto no mercado nacional como no internacional. A escolha do tipo de pulverizador está associada ao tamanho de área e às aplicações a que se destinam, ou seja, o tipo da lavoura. Dentre esses se encontram os pulverizadores manuais (geralmente com carga útil de 0,25 até 1,0 l), pulverizador costal (operação manual, motorizado ou pressurizado), pulverizador de barra

(tracionado e acoplado a trator), pulverizador auto-propelido (que dispensa o uso do trator e pode operar com barras longas da ordem de 30 m e vários bicos pulverizadores), também considerando a inclusão de atomizadores, cuja velocidade de ar gerada durante seu funcionamento lança o produto (calda ou pó) a grandes distâncias. Atualmente, nas aplicações terrestres, o pulverizador autopropelido é o mais utilizado nas propriedades de grande porte, uma vez que seu uso possibilita alcançar maiores áreas e rendimentos.

Os controladores de pulverização eletrônicos, mais comuns em pulverizadores modernos, podem utilizar calda pronta (água + agrotóxicos) ou injeção indireta. Os que utilizam calda pronta consideram em seu arranjo instrumental a injeção da calda pela bomba hidráulica do pulverizador já preparada previamente nas barras de pulverização, podendo a mesma ser admitida juntamente com o ar externo. Já na injeção direta, o produto ativo é injetado de forma que se possa preparar a calda que será aplicada logo após seu preparo e envio à barra onde se encontram instalados os bicos pulverizadores. Para essa última configuração é importante observar o tempo de resposta do pulverizador em função da aplicação e praga a ser controlada. Esse tempo está relacionado à dosagem correta em uma aplicação, sendo definido entre a ação de comando para a troca de vazão e sua efetiva ação de mudança nos bicos aplicadores. Assim, variando em função do ponto de injeção do produto ativo no sistema hidráulico, das dimensões da tubulação utilizada no pulverizador, da densidade e viscosidade da calda e outras características envolvidas nas conexões entre partes do sistema pulverizador (Antuniassi, 1999). Vondricka e Lammers (2009) discutem os problemas da injeção direta em conexão com controle em tempo real, propondo melhorias de partes do sistema para reduzir o tempo de resposta nessa modalidade de sistema pulverizador. Os pulverizadores que dispõem do sistema de injeção direta passaram mais recentemente a ser novamente estudados, incluindo a aplicação em taxa variada. Esse sistema permite a variação e o controle da vazão da calda, através das ações das válvulas, bombas de injeção e bomba de pulverização, assim como da dose a ser aplicada, se utilizando técnicas de controle da bomba de injeção (Mercaldi, 2012; Felizardo, 2013). De acordo com Clarke (2018), a demanda pela tecnologia de injeção direta tem sido impulsionada na América do Norte e na Europa, devido a crescentes problemas de resistência a agrotóxicos observados principalmente nas plantas invasoras (Powles, 2008). Trabalhos anteriores também demonstraram sucesso no uso de controladores proporcional integral e/ou derivativo (PID) clássicos e

por escalonamento dos ganhos, utilizando sistemas fuzzy, ou ainda através da inclusão de uma função não linear para sintonia dos ganhos do controlador na regulação da vazão ou da pressão (Mercaldi, 2012; Gonzalez et al., 2012; Pawlowski et al., 2017). A regulação ou controle da taxa de aplicação dos pulverizadores de barra é realizado através de válvulas proporcionais do tipo agulha, borboleta ou esfera (Steward; Humburg, 2000; Felizardo et al., 2016). Os controladores utilizados nos sistemas pulverizadores são em sua grande maioria do tipo PID, em sua forma clássica ou com alterações como o escalonamento dos ganhos para atender critérios de desempenho (Bennur; Taylor, 2010).

Os pulverizadores com injeção direta podem ser divididos em subgrupos de acordo com o local onde ocorre a injeção: central, na barra de seção ou nos bicos pulverizadores. Quanto mais longe estiver o ponto de injeção em relação aos bicos pulverizadores, maior será o tempo de resposta e melhor será a homogeneidade da calda. Por outro lado, aproximar o ponto de injeção dos bicos pulverizadores reduz o atraso de transporte entre a mistura da calda e sua aplicação, logo há uma relação (de custo/benefício) que deve ser observada entre a homogeneidade da calda e o tempo de resposta desejado (Mercaldi, 2012; Mercaldi et al., 2019). Trabalhos que visam melhores soluções ao problema apresentado têm sido desenvolvidos, envolvendo a regulação da vazão da calda com o uso dos controladores preditivos. Felizardo (2013) abordou o uso dessa modalidade de controladores baseando-se no uso do controle preditivo baseado em modelo (MPC, em inglês) para regulação da vazão em um pulverizador de injeção direta.

Recentemente, Mercaldi et al. (2019) e Schutz (2021) apresentaram o desenvolvimento de um controle preditivo generalizado (GPC, em inglês), considerando versões embarcadas em microcontrolador e conjuntos específicos de restrições no modelo de operação, ambos aplicados a sistemas de pulverização em taxa variada com e sem injeção direta, incluindo a possibilidade de simulação da planta usando Hardware-in-the-Loop. Como vantagens do controle preditivo destacam-se possibilidades do tratamento de restrições que podem ser incorporadas no projeto do controlador através do uso de um algoritmo na etapa de otimização da função custo, a capacidade de incluir tempos de atraso e a possibilidade de incluir informações de referências futuras provenientes de um mapa de prescrição. Schutz e coautores (2022) propuseram a construção de sistema inteligente baseado em fuzzy-Mamdani (Mamdani; Assilian, 1975) para o escalonamento dos parâmetros de ajuste do controlador GPC.

Este capítulo trata prioritariamente do desenvolvimento de controladores eletrônicos que foram testados e validados para uso em pulverizadores agrícolas, os quais agregam robustez operacional e confiabilidade, assim como qualidade ao processo de aplicação para o controle de pragas. Também apresenta integração de soft-sensores para estimativas a priori dos parâmetros de um pulverizador para se inferir a qualidade desejada para um processo de aplicação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### a. Sistema de desenvolvimento de pulverizadores agrícolas

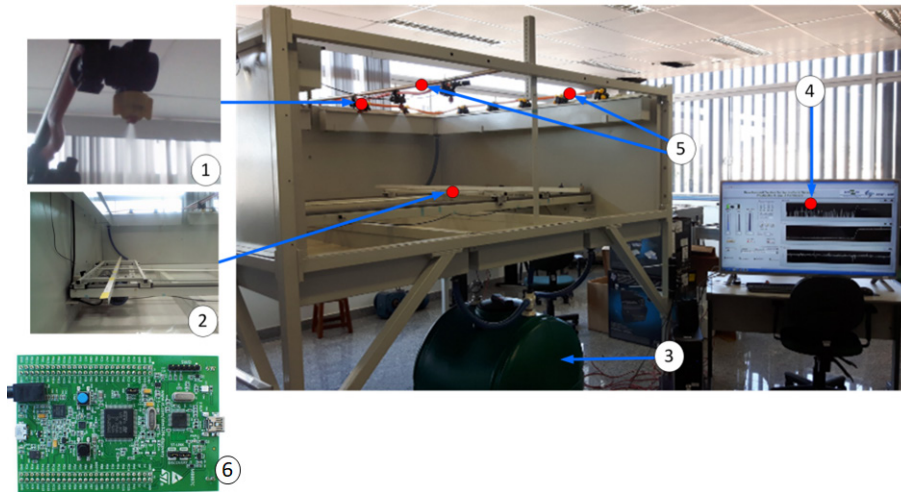
Para validar os controladores e os soft-sensores foi utilizada uma plataforma desenvolvida pela Embrapa Instrumentação em parceria com a Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. A plataforma utilizada para análise e desenvolvimento de pulverizadores funciona como um sistema de desenvolvimento de pulverizadores agrícolas (SDPA) e possui um controlador embarcado de tempo real da *National Instruments*<sup>®</sup> (NI-cRIO), o qual é programado na plataforma LabView<sup>®</sup> (National Instruments, 2019). Essa arquitetura apresenta quatro componentes principais: um processador em tempo real, uma matriz de portas programáveis pelo usuário (FPGA, em inglês), entradas e saídas (E/S) modulares e ferramentas de software adequado para o desenvolvimento ou programação de sistemas de controle, processamento digital de sinais, controle de processos, sistemas supervisórios e de aquisição de dados (Cruvinel et al., 2016). O SDPA (Figura 1) é também baseado em uma configuração de um pulverizador hidráulico de barra modular e possui um avançado sistema de integração que permite o projeto de arquiteturas envolvendo conexões de componentes e dispositivos hidráulicos, bombas hidráulicas e elétricas, mecânica de precisão, circuitos eletrônicos e algoritmos computacionais.

A arquitetura desse sistema de desenvolvimento foi estabelecida considerando o conceito de instrumentação programável, sendo assim um sistema flexível, capaz de viabilizar a utilização de diferentes circuitos e conexões, possibilitando utilizar a tecnologia de aplicação em sua forma tradicional ou em taxa variada. O microcontrolador STM32F407 foi utilizado para embarcar os controladores PID, GPC e fuzzy GPC para o controle da vazão de calda e de injeção.

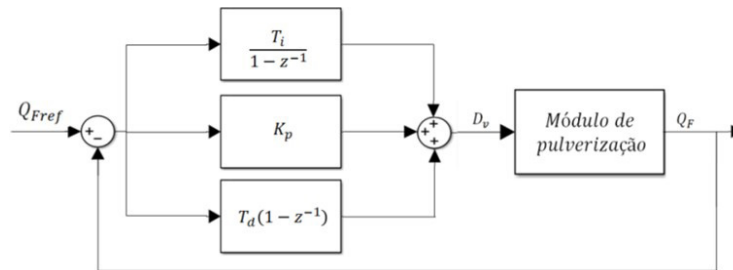
### b. Controladores PID, GPC e fuzzy GPC

A arquitetura dos controladores PID em diagrama de blocos é apresentada na Figura 2. Essa modalida-





**Figura 1.** Sistema de desenvolvimento para pulverizadores agrícolas, dedicado à aplicação de insumos líquidos: (1) bico de pulverização, (2) sistema que emula o movimento do pulverizador, (3) tanque de descarte de agrotóxicos, (4) interface supervisória e de aquisição de dados, (5) barras de pulverização, (6) placa para controladores embarcados.



**Figura 2.** Diagrama de blocos do controlador PID discreto, onde  $Q_{ref}$  é a vazão de referência,  $e$  o erro,  $D_v$  o duty-cycle do sinal PWM e  $Q_f$  a vazão de calda (adaptado de Mercaldi et al., 2019).

de de controlador apresenta uma ação de controle baseada em operações de integração, diferenciação e multiplicação do erro. Sendo mais utilizados para o controle de vazão de pulverizadores. No caso discreto, a ação de controle  $u(k)$  do PID na sua forma fundamental é dada por:

$$u(k) - u(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (1)$$

em que:

$e$  é o erro,  $q_0 = K_p \left(1 + \frac{T_d}{T_s}\right)$ ,  $q_1 = -K_p \left(1 + 2\frac{T_d}{T_s} - \frac{T_s}{T_i}\right)$  e  $q_2 = K_p \frac{T_d}{T_s}$ , com  $K_p$ ,  $T_d$  e  $T_i$  sendo os ganhos proporcional, derivativo e integrativo, respectivamente, e  $T_s$  a taxa de amostragem.

Quanto ao controlador preditivo generalizado (GPC), o mesmo foi proposto originalmente por Clarke, Mohtadi e Tuffs (1987). É uma das mais difundidas técnicas utilizadas para controle preditivo em processos industriais. Sua formulação foi baseada em modelo de média móvel autorregressiva controlada e integrada (CARIMA, em inglês), sendo representado na sua forma incremental como:

$$a(z)\Delta y_k = b(z)\Delta u_k + T(z)\zeta_k \quad (2)$$

em que

$$a(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (3)$$

$$b(z) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \quad (4)$$

$$T(z) = t_1 + t_2 z^{-1} + \dots + t_{n_t} z^{-n_t} \quad (5)$$

com  $a(z)$  e  $b(z)$  sendo respectivamente polinômios de ordem  $n_a$  e  $n_b$ ,  $T(z)$  um polinômio de projeto,  $\Delta = 1 - z^{-1}$ ,  $\zeta_k$  um ruído branco de média nula,  $y_k$  a saída e  $u_k$  o sinal de controle. Em (2), fazendo  $\tilde{A}(z) = \Delta a(z)$  chega-se em:

$$\tilde{A}(z) = 1 + \tilde{a}_1 z^{-1} + \tilde{a}_2 z^{-2} + \dots + \tilde{a}_{n_a+1} z^{-n_a-1} \quad (6)$$

A lei de controle do GPC é obtida da minimização de uma função custo quadrática (Rossiter, 2003). Para sistemas do tipo entrada simples – saída simples (SISO, em inglês), a função custo quadrática é dada por:

$$J(\Delta u, e) = \sum_{k=1}^{N_p} \tilde{e}(k+1) \delta \tilde{e}^T(k+1) + \sum_{k=1}^{N_c} \Delta \tilde{u}(k) \lambda \Delta \tilde{u}^T(k) \quad (7) \quad \tilde{r}(k) = \begin{bmatrix} r(k+1) & r(k+2) & \dots & r(k-N_p) \end{bmatrix} \quad (11)$$

em que  $\delta$  é o fator de ponderação do erro,  $e$  é o erro e  $\lambda$  é o fator de ponderação dos incrementos de controle,  $\Delta u$ ,  $N_p$  e  $N_c$  são o horizonte de predição e o horizonte de controle, respectivamente.

A lei de controle é dada por:

$$\Delta u(k) = E_1^T S^{-1} a \quad (8)$$

em que

$$S = \delta H_1^T H_1 + \lambda I \text{ com } H_1 = H(1:N_p, 1:N_c) \text{ e}$$

$$a = X \begin{bmatrix} \Delta \tilde{u}(k-2) & \tilde{y}(k-1) & \tilde{r}(k) \end{bmatrix}^T,$$

$$X = \begin{bmatrix} \delta H_1^T P & \delta H_1^T Q - \delta H_1^T L \end{bmatrix}, L = [1 \ 1 \dots 1]^T \text{ e}$$

$$E_1^T = [1 \ 0 \dots 0] \text{ com } H = C_A^{-1} C_b, P = C_A^{-1} H_b \text{ e}$$

$Q = -C_A^{-1} H_A$  matrizes de ordem  $N_p \times N_p$ ,  $N_p \times N_b$  e  $N_p \times N_a$ , respectivamente. As matrizes  $C_b$ ,  $H_b$ ,  $H_A$  e  $C_A$  de ordem  $N_p \times N_p$ ,  $N_p \times N_b$ ,  $N_p \times N_a$  e  $N_p \times N_p$ , nessa ordem, são obtidas através dos polinômios  $\tilde{A}(z)$  e  $\tilde{B}(z)$  do modelo CARIMA e pelas matrizes Toeplitz e Hankel.

Os vetores identificados com setas  $y$ ,  $\Delta u$  e  $r$  apontando para a esquerda e direita correspondem a elementos passados e futuros da saída do sistema, variação da ação de controle e referência, respectivamente dados por:

$$\tilde{y}(k-1) = \begin{bmatrix} y(k) & y(k-1) & \dots & y(k-n_a) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Delta \tilde{u}(k-2) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) & \Delta u(k-2) & \dots & \Delta u(k-n_b+1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Visando utilizar a capacidade de incorporação de restrições no GPC e tendo como objetivo sua construção embarcada em microcontroladores, foi essencial a adoção de algoritmos computacionalmente eficientes, ou seja, com capacidade de resolver cálculos de programação quadrática em cada período de amostragem. Desse modo foram utilizados os algoritmos da projeção do gradiente acelerado duplamente (GPAD – *Accelerated Dual Gradient Projection*) e de Gauss-Seidel projetado e modificado (PGS – *Projected Gauss-Seidel* e PGSM – *Projected Gauss-Seidel Modified*) (Mercaldi et al., 2019; Peccin et al., 2019).

Considerando como elemento atuador do módulo de pulverização, uma válvula proporcional do tipo agulha, verificaram-se duas não linearidades principais, a primeira relativa à variação da sua resistência fluidica e a segunda decorrente de uma zona morta. A zona morta é a mais relevante em termos de degradação do desempenho e da precisão dos controladores testados. Para resolver os problemas de baixa precisão de controle na região de zona morta, foi desenvolvido um sistema de controle fuzzy-GPC capaz de diminuir a variação na ação de controle (Schutz, 2022). A Figura 3 apresenta em diagrama de blocos a estratégia do controlador fuzzy-GPC desenvolvido.

O sistema fuzzy, mostrado como parte da Figura 3, tem como entradas o erro e sua variação:  $E$  e  $E\Delta$ , respectivamente, e como saídas  $\hat{\lambda}$  e  $\hat{\delta}$ , as quais geram a estimativa dos pesos  $\lambda$  e  $\delta$  do controlador fuzzy-GPC a cada iteração. Em Schutz et al. (2022) também é apresentado um algoritmo capaz de realizar a atualização em tempo real desses parâmetros, sem a necessidade de recalculas as matrizes Toeplitz e Hankel do controlador fuzzy-GPC.

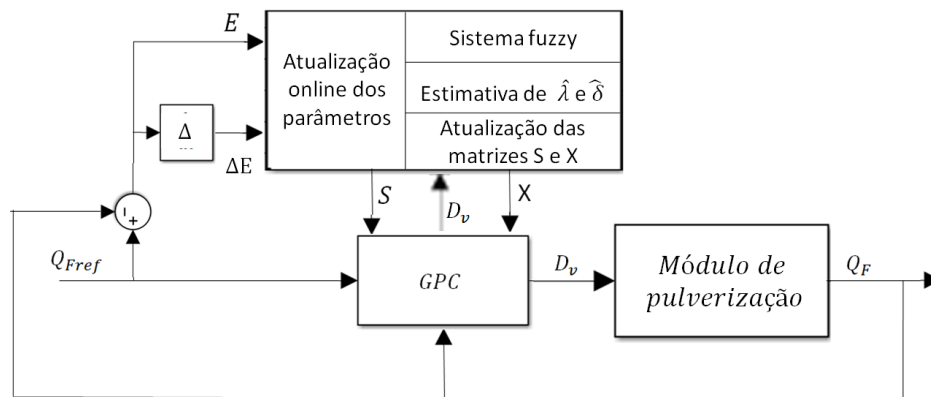


Figura 3. Diagrama de blocos do controlador fuzzy-GPC para o controle do volume de calda de um pulverizador,  $Q_{ref}$  vazão de referência,  $D_v$  duty cycle do sinal de controle PWM,  $Q_f$  vazão de calda,  $E$  erro,  $E\Delta$  variação do erro (adaptado de Schutz et al., 2022).

### c. Correção de erros de aplicação em taxa variada

Em pulverizadores de barra, a vazão em cada ponta é dada por:

$$Q_p = \frac{D_p v_p E}{60000} \quad (12)$$

onde

$Q_p$  é a vazão na ponta [l/min],  $v_p$  é a velocidade da ponta [km/h],  $E$  é o espaçamento entre as pontas [cm] e  $D$  é a taxa de aplicação [l/ha] do agrotóxico.

Para avaliar erros de aplicação foi estabelecida uma trajetória curvilínea do tipo espiral (Figura 4a), onde cada ponto é espaçado do anterior por 10 m (Figura 4b). Para avaliar o modelo de correção desenvolvido foi considerada a geometria de Ackermann (GA), ou seja, para velocidades suficientemente baixas de forma que não ocorra deslizamento nas rodas (Jazar, 2008).

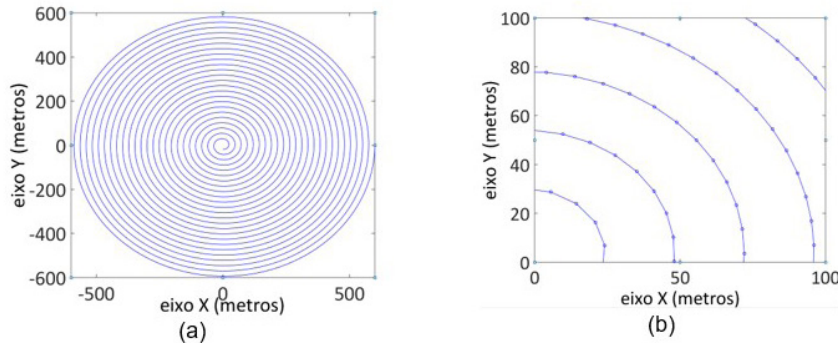
Para obter as velocidades de cada bico pulverizador foi aplicado um modelo cinemático para o conjunto trator-pulverizador, considerando vetores  $r = [x \ y]^T$  e  $s = [x_p \ y_p]^T$ , referentes às posições do trator e da barra do pulverizador, respectivamente.

### d. Soft-sensores

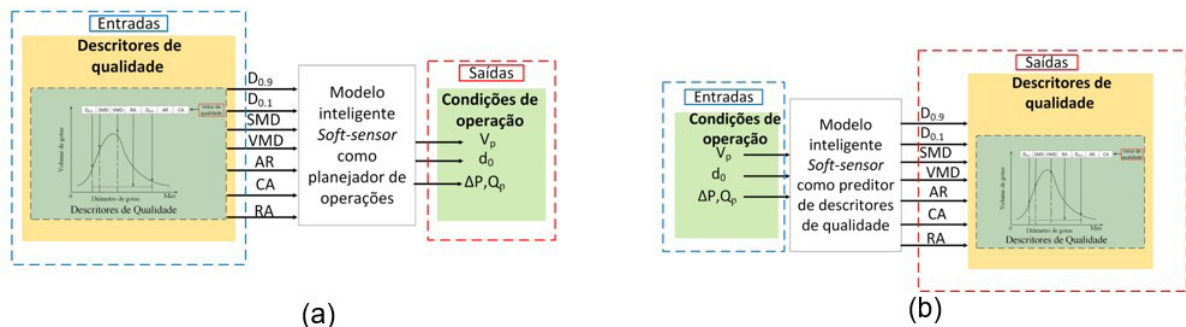
Alinhado à necessidade de garantir qualidade durante o processo de aplicação foi elaborada uma estratégia baseada em soft-sensores, os quais auxiliam no planejamento das condições de operações da vazão e da pressão dos controladores. As arquiteturas apresentadas em diagramas de blocos da Figura 5 ilustram os elementos para a predição das variáveis que definem a qualidade e ajustes das condições de operação do pulverizador.

Na construção dos soft-sensores foram utilizados método paramétrico de regressão linear e análise de componentes principais (PCA, em inglês). Dados históricos foram obtidos com ensaios laboratoriais com o SDPA, e diferentes tipos de bicos de pulverização foram ensaiados considerando variações de pressão e vazão na barra de pulverização. A calibração dos soft-sensores foi baseada na seleção de dados históricos e filtragem utilizando um algoritmo paramétrico de regressão de vizinhos mais próximos (k-NN, em inglês).

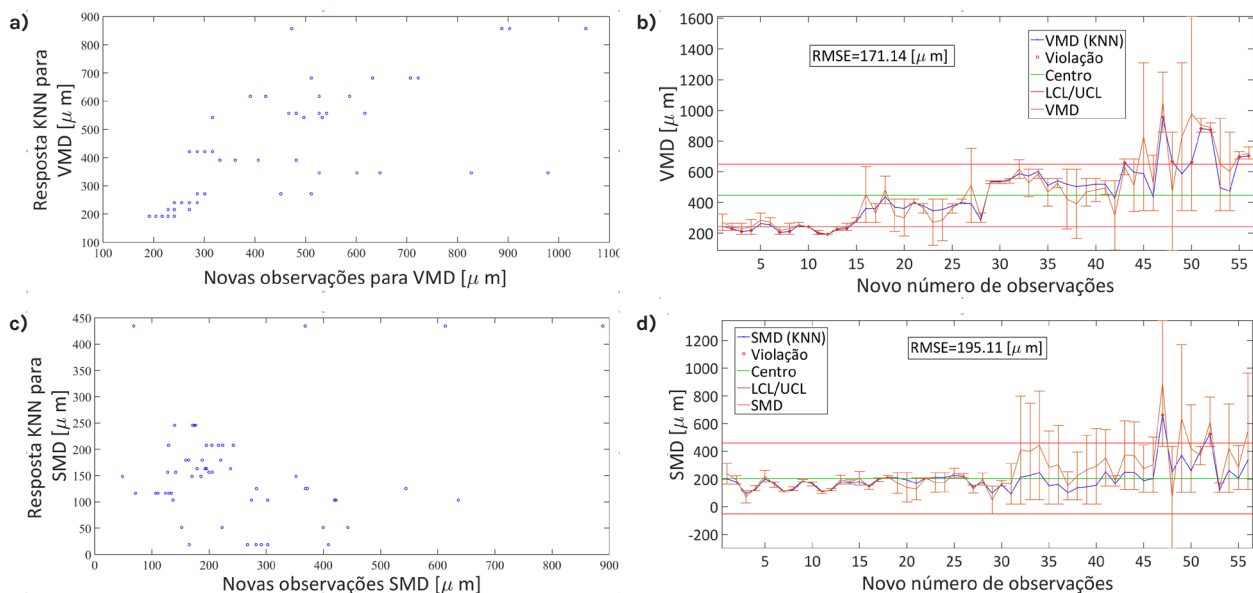
Os resultados desta pesquisa revelam a utilidade de sensores suaves na aplicação de defensivos agrícolas e como base de conhecimento para auxiliar na tomada de decisões agrícolas (Peñaloza et al., 2021).



**Figura 4.** (a) percurso projetado para avaliar o desempenho do conjunto trator pulverizador em trajetórias curvilíneas; (b) detalhe do espaçamento entre os pontos (adaptado de Peñaloza, 2014).



**Figura 5.** Diagrama esquemático da arquitetura estabelecida para os soft-sensores customizados para a tecnologia de aplicação em controle de pragas agrícolas, sendo em (a) preditor de descritores de qualidade e em (b) planejador de operações (adaptado de Peñaloza; Oliveria; Cruvinel, 2021).



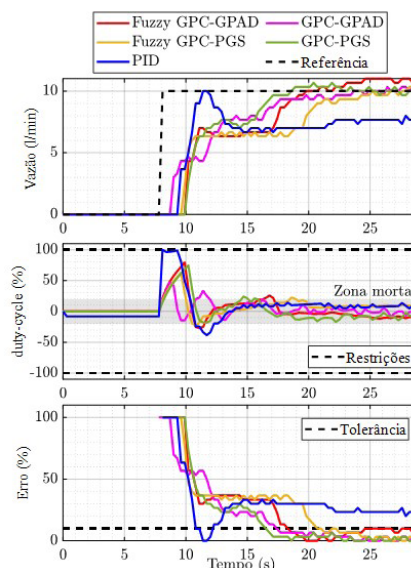
**Figura 6.** Resultados de avaliação para os soft-sensores e descritores de qualidade DMV e SMD, (a) dispersão para o diâmetro mediano volumétrico (DMV), (b) faixas de controle para o diâmetro mediano volumétrico (DMV), (c) dispersão para o diâmetro mediano de Sauter (SMD), (d) faixas de controle para o diâmetro mediano de Sauter (SMD).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os ensaios de validação dos soft-sensores se utilizou o SDPA, levando-se em conta a inclusão de um sistema de emulação da velocidade de aplicação como ocorre com pulverizadores comerciais. Adicionalmente, foi considerado um conjunto de medidas utilizando conjuntos de bicos pulverizadores de cone cheio modelos CH06, CH03, CH01 e CH05, da Magnojet® e papéis hidrossensíveis para a coleta de informação sobre os espectros de gotas gerados com o uso de um DropScope® da empresa SprayX®. Essa operação possibilitou a organização de bases de dados sobre espectros de gotas para o auxílio à tomada de decisão sobre ganhos de qualidade na seleção a priori do bico pulverizador e também para ajustes de parâmetros de operação do pulverizador. A Figura 6 ilustra exemplos de resultados da aplicação dos soft-sensores, onde se é possível observar a dispersão para o diâmetro mediano volumétrico (DMV) e do diâmetro mediano de Sauter (SMD) e o estabelecimento de faixas de segurança para o controle dos mesmos.

Resultados decorrentes do uso de controladores PID, GPC e CPC-fuzzy em sistemas pulverizadores podem ser observados nas Figuras 7, 8, 9 e 10, as quais apresentam leituras de vazão  $Q_f$ ,  $duty-cycle D_v$  e erro de leitura quando utilizados bicos pulverizadores de cone cheio modelos CH06, CH03, CH01 e CH05, da Magnojet®.

No experimento organizado para a validação dos diferentes controladores quando da aplicação da referência degrau pode-se observar que os controlado-

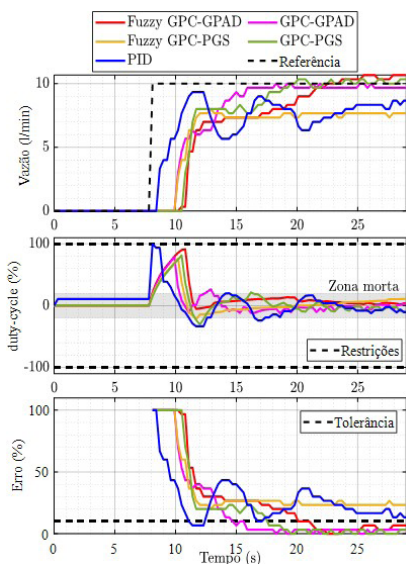


**Figura 7.** Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH06.

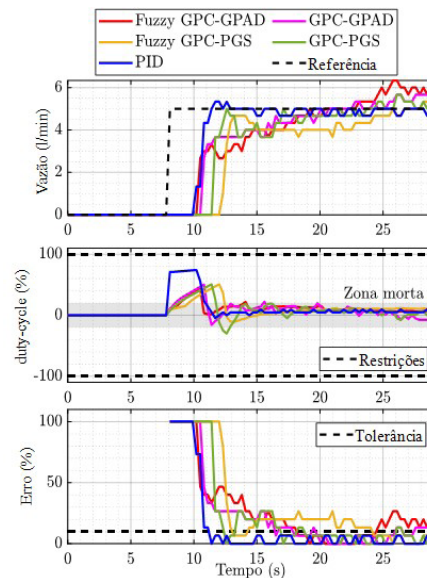
res GPC e GPC-fuzzy conseguiram atingir em regime um erro inferior à tolerância de 10% que foi pré-estipulada. Já o controlador PID de forma geral apresentou um erro maior, com exceção ao ensaio realizado com o bico pulverizador CH05, onde a referência não levou à saturação da entrada no controle. Para esse caso, apesar do erro observado, quando em regime o controlador PID foi o que apresentou o menor tempo de resposta.

Por outro lado, a inclusão da lógica fuzzy junto ao controlador GPC utilizando o algoritmo PGSM levou

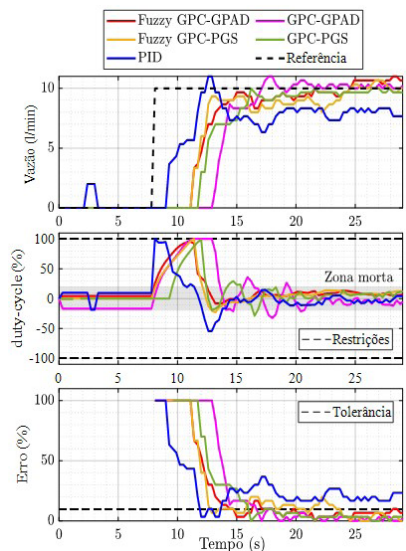




**Figura 8.** Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH03.



**Figura 10.** Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH05.



**Figura 9.** Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH01.

a um tempo de acomodação mais longo quando comparado ao uso do controlador GPC convencional operando com o mesmo algoritmo. Tal resultado pode ter sido causado devido ao uso de parametrização da lógica fuzzy, tendo sido organizado utilizando MatLab® e o modelo GPAD, o que justificaria o controlador GPC-fuzzy (GPAD) apresentar um tempo de acomodação mais curto, sendo, portanto, superior aos demais controladores avaliados.

Analisando as curvas do sinal do ciclo de trabalho dos controladores é também possível observar os efeitos da zona morta no sinal de controle, o que poderia ter levado a erros de regime e oscilações, como é o ca-

so do GPC (GPAD) entre 14s e 20s e do GPC (PGSM) entre 11s e 20s (Figura 9), porém esses efeitos foram atenuados quando da incorporação da lógica fuzzy.

É ainda possível observar nos resultados, quando avaliado considerando a resposta à aplicação de um sinal degrau, que a ocorrência de atraso pode ser minimizada com o uso de estratégias de antecipação de referências, o que pode resultar em melhoras na resposta e diminuição do erro de aplicação. Tal aspecto pode ser parte do desenvolvimento de um pulverizador, uma vez que mapas de prescrição de agrotóxicos podem ser formulados ou definidos em tempo real com o uso de sistemas de visão computacional, auxiliando na definição prévia das referências requeridas para o ajuste de antecipações operacionais.

Na etapa de validação dos controladores PID, GPC e GPC-fuzzy foi utilizado o software MatLab®, no qual estes foram sintonizados via simulação, para em seguida serem embarcados no STM32F407-Discovery utilizando a linguagem C+, considerando como variável de controle a vazão da calda de pulverização.

Para garantir a segurança na operação do sistema hidráulico do SPDS foi evitada a ocorrência de picos de pressão superiores a 10 bar na barra, sendo necessário ajustar o valor das referências quando utilizam as pontas modelos CH05 e CH01. O sistema fuzzy foi embarcado junto ao controlador GPC, para isso foi adotada uma estratégia de discretização da superfície que relaciona as entradas e saídas do sistema fuzzy, possibilitando a representação dessa superfície por uma matriz de 300 pontos. Os ensaios utilizaram duas barras com sete pontas de pulverização cada, espaçadas por 50 cm. A velocidade de trabalho é

de 10 km/h e vazão constante em 40 l/min na bomba hidráulica de pulverização.

Em termos de erro de aplicação, outro aspecto a ser considerado na utilização de pulverizadores de barra com pontas convencionais é que a vazão da calda a ser aplicada se distribui igualmente entre os bicos de pulverização. Assim, é possível definir controladores de pulverização que venham a apresentar erros de aplicação inferiores a 5%. Entretanto, outro problema que pode ocorrer no processo de aplicação de agrotóxicos é o erro de aplicação decorrente das trajetórias desenvolvidas pela máquina agrícola pulverizadora. Em trajetórias curvilíneas, é possível limitar o erro de aplicação dentro de valores aceitáveis baseado na modelagem da mecânica do esterçamento da máquina agrícola. Um exemplo disso foi apresentado em Penalosa (2014), considerando um trator John Deere modelo 6110J e um pulverizador tratorizado tipo barra-carreta da empresa Jacto modelo Advance-3000-AM24<sup>®</sup> operando com manobras curvilíneas e realizando esterçamento das rodas dianteiras, conforme ilustrado na Figura 11. Nesse exemplo, foi possível observar a ocorrência de variações da vazão nos bicos pulverizadores que estão dispostos na barra em virtude da variação da velocidade angular ao longo da barra de pulverização.

O erro de aplicação neste caso é dado em função da diferença de velocidade entre os bicos pulverizadores, as quais são relativas ao raio de curva no centro do veículo pulverizador, onde é medida a velocidade para cálculo da vazão de aplicação. Assim, a velocidade de cada bico pulverizador é dada em função da velocidade angular, ou seja,  $v_p = \omega R_p$ , sendo a velocidade angular do pulverizador medida em [rad/s] e  $R_p$  é a posição do bico pulverizador com relação ao centro do raio da curva  $R$ , dado em [m].

Da Figura 11, definindo  $s = r - z$ , obtém-se a posição do pulverizador em função da posição do trator e a velocidade dos bicos pulverizadores em função da velocidade do trator, na forma:

$$\begin{bmatrix} x_p(t) & y_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) - L \cos(\theta_1) & y(t) - L \sin(\theta_1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p & \dot{y}_p & \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} + L \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) & \dot{y} + L \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) & \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

em que

$L$  é o comprimento do pulverizador.

Com esse modelo cinemático do pulverizador, passou a ser possível calcular a velocidade do pulverizador e as velocidades de cada bico pulverizador. Pode ser observado que o modelo cinemático leva em conta o centro de rotação e o centro de massa do trator, assim como as dimensões e as distâncias do ponto de acoplamento com respeito ao trator e ao pulverizador. Para se encontrar a taxa que é aplicada para cada bico pulverizador são usadas as equações que definem a posição e orientação do trator e do pulverizador, ou seja, (12) e (13), bem como o modelo que representa a razão de fluxo da calda.

Adicionalmente, através do raio de curva do conjunto trator-pulverizador pode-se agora calcular o ângulo médio de esterçamento das rodas interna e externa do trator para avaliar o erro de aplicação em função do ângulo de esterçamento das rodas, o qual pode ser dado por:

$$\delta(t) = \left( \frac{\sqrt{R(t)^2 - a_2^2}}{(a_2 + a_1)} \right) \quad (14)$$

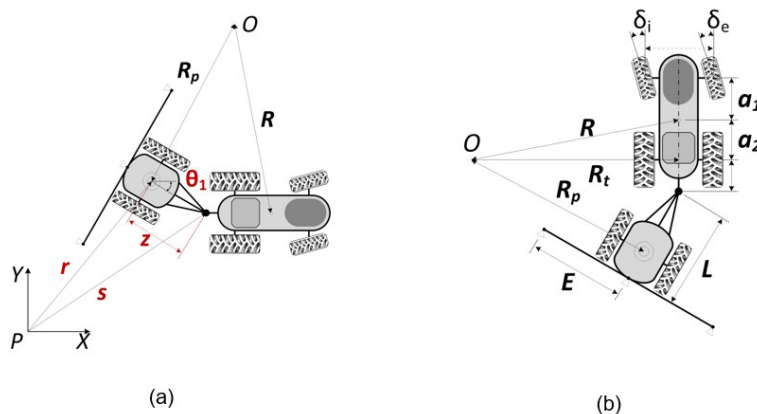
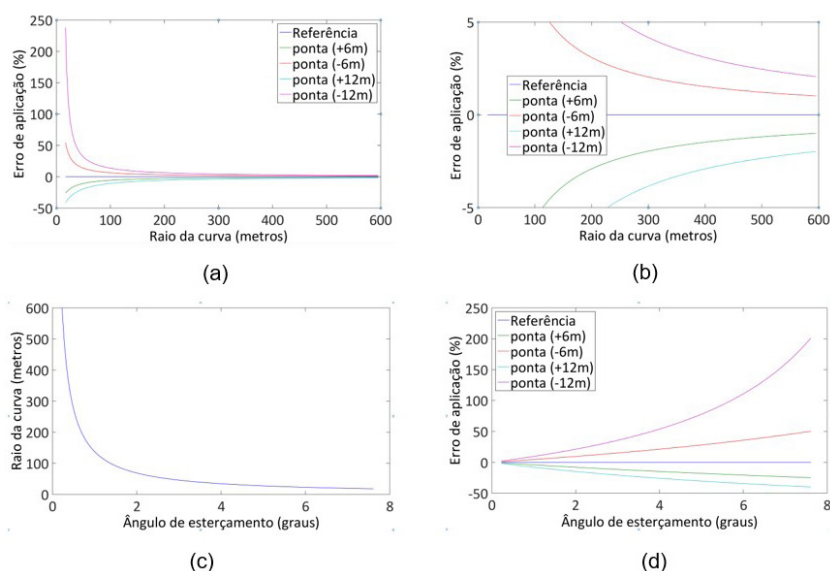


Figura 11. (a) cinemática do conjunto trator-pulverizador, (b) detalhe das variáveis do modelo do esterçamento para curvas.



**Figura 12.** Em (a) observa-se o erro de aplicação em função do raio, em (b) observam-se detalhes onde o erro é inferior a  $\pm 5\%$ , em (c) observa-se a variação do raio de curvatura versus o ângulo de esterçamento, (d) os erros da aplicação em função do ângulo de esterçamento.

em que

$R(t)$  é o rádio de curvatura do trator,  $a_1$  e  $a_2$  são constantes que determinam a distância entre o centro de massa e o eixo das rodas dianteiras e traseiras respectivamente.

Para validar o modelo cinemático é usada a distância entre os vetores de posição do conjunto trator-pulverizador. Seja  $b$  a distância euclidiana entre os vetores  $r$  e  $s$ . Calculando  $b$  para todos os valores de posição do trator e pulverizador para certa velocidade, deve-se encontrar como resultado um valor constante igual à magnitude do vetor  $|z| = L$ . Este resultado é consistente com a diferença  $z = r - s$  que foi o ponto de partida da modelagem da cinemática do conjunto trator-pulverizador.

Na Figura 12, é apresentada graficamente a relação do erro de aplicação em função do raio de curva para bicos pulverizadores nas posições de  $\pm 6m$  e  $\pm 12m$ , o valor de referência, a posição  $0,0 m$  com relação ao centro do pulverizador, bem como os erros que ocorrem na aplicação da calda em função do ângulo de esterçamento. Também é possível verificar o valor do raio de curva ( $\sim 250m$ ), onde o erro de aplicação é inferior a  $\pm 5\%$ , no pior caso (posição igual a  $-12m$ ). Da mesma forma, é também possível observar graficamente o comportamento da relação ângulo de esterçamento versus raio da curvatura, onde quando ocorre diminuição do ângulo de esterçamento ocorre aumento do raio de curvatura, aproximando-se de um comportamento linear. Também são apresentadas variações no erro de aplicação em função do ângulo de esterçamento para bicos pulverizadores nas

posições  $\pm 6m$  e  $\pm 12m$  e o valor de referência. Em valores absolutos, o erro de aplicação aumenta quando ocorre o aumento do ângulo de esterçamento.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram discutidos e comparados resultados experimentais obtidos com a aplicação de soft-sensores, controladores embarcados PID, GPC e fuzzy-GPC para o controle de vazão de pulverizadores agrícolas, bem como considerações sobre o erro de aplicação decorrente das trajetórias e velocidades empregadas durante um processo de aplicação em área de cultura.

O uso dos soft-sensores ofereceu a possibilidade de inferir a priori de uma operação os valores estimados para se agregar qualidade na aplicação tomando por base o espectro de gota e a definição sobre os bicos pulverizadores a serem utilizados. De fato, o uso de uma base de conhecimento possibilita ganhos na tomada de decisão sobre o ajuste dos parâmetros operacionais a serem empregados no momento de uma aplicação.

Para os controladores embarcados avaliados, conclusivamente foi possível verificar que o uso dos controladores preditivos (GPC e fuzzy-GPC) ofereceu vantagens operacionais para sistemas pulverizadores que apresentam não linearidades em relação à vazão e seu comportamento no tempo utilizado para as aplicações, bem como em relação a dinâmicas no transporte da calda e do tempo morto relacionado às variações da pressão e da vazão na barra onde



se encontram os bicos pulverizadores. A utilização de controladores baseados na abordagem fuzzy como ferramenta de inclusão de não linearidade na estratégia do controlador GPC se destaca como uma inovação. A adição de uma componente adaptativa a partir da inclusão da lógica fuzzy ao GPC se mostrou conclusivamente capaz de diminuir a variação excessiva na ação de controle, o que acarreta aumento da vida útil da válvula proporcional, sem afetar a incorporação das restrições, o que é também uma das principais vantagens da aplicação de um controlador GPC embarcado para sistemas pulverizadores terrestres.

Adicionalmente, o emprego das informações sobre a trajetória e a velocidade do maquinário de pulverização em associação às informações cinemáticas do arranjo trator-pulverizador viabilizaram o estabelecimento de um modelo de correção da aplicação, o que agrega valor e viabiliza minimizar erros de aplicação, seja ela na forma convencional ou mesmo quando se utiliza a aplicação em taxa variada. Os resultados confirmam a viabilidade da integração dessas técnicas para ganhos de robustez e eficácia de sistemas pulverizadores, assim como de potencial ganho na qualidade e eficiência nas aplicações dos agrotóxicos para o combate às pragas agrícolas.

Para trabalhos futuros são considerados integrar e embarcar os métodos ora validados diretamente junto aos bicos pulverizadores, de forma a se buscar estabelecer conceitualmente bicos pulverizadores inteligentes que operem de forma não supervisionada na tomada de decisão em tempo real para o controle de vazão em taxa variada durante processos de combate às pragas agrícolas em área de cultura.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo fomento via projeto “Desenvolvimento de Modelos, Ferramentas e Instrumentos Automatizados Avançados para a Pulverização Agrícola de Precisão” (SEG 01.14.09.001.05.00.05) e apoio da Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo (USP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, sob a bolsa 88887.703189/2022-00), e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp, sob a bolsa 2023/06759-0), assim como à Magnojet pelo fornecimento dos bicos pulverizadores para os experimentos laboratoriais e de campo.

#### REFERÊNCIAS

- ANTUNIASSI, U. **Avaliação de sistemas de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão**. 1999. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).
- BENNUR, J. P.; TAYLOR, R. P. Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 26, n. 6, p. 1069-1075, 2010. DOI: <http://doi.org/10.13031/2013.35903>.
- BONADIO, J. A. B.; NETO, R. A.; COSTA, N. V.; RAMELLA, J. R. P. *Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas: inovações*. In: KUHN, O. J.; NUNES, R. V.; STANGARLIN, J. R.; RAMPIM, L.; FEY, R.; COSTA, N. V.; COSTA, P. B.; GUIMARÃES, V. F.; ZAMBOM, M. A. (orgs.). **Ciências Agrárias: tecnologias e perspectivas**. Marechal Cândido Rondon: Unioeste, 2015. p. 207-225
- CHAIM, A. **Manual de tecnologia de aplicação de agrotóxicos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 73 p.
- CHRISTOFOLETTI, J. C. **Considerações sobre a deriva nas pulverizações agrícolas e seu controle**. São Paulo: Teejet South América, 1999. 15 p.
- CLARKE, D. W.; MOHTADI, C.; TUFFS, P. S. Generalized predictive control – Part I: the basic algorithm. **Automatica**, v. 23, n. 1, p. 137-148, 1987. DOI: [http://doi.org/10.1016/0005-1098\(87\)90087-2](http://doi.org/10.1016/0005-1098(87)90087-2).
- CLARKE, A. **Analysis: Is direct injection spraying technology about to take off?** Future Farming, 2018. Disponível em: <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/analysis-is-direct-injection-spraying-technology-about-to-take-off/>. Acesso em: 5 de out. de 2022.
- CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; MERCALDI, H. V.; PEÑALOZA, E. A. G.; FELIZARDO, K. R. An advanced sensors-based platform for the development of agricultural sprayers. In: YURISH, S.Y. (ed.). **Advances in Sensors: reviews**. Barcelona: International Frequency Sensor Association (IFSA), v. 4, p. 181-204, 2016.
- CRUVINEL, P. E.; MERCADI, H. V.; ANDRADE, P. B.; PENALOZA, E. A. G. *Real-time evaluation of failure and reliability in agricultural sprayers using embedded sensors and controller area bus protocol*. **International Journal on Advances in Systems and Measurements**, v. 13, p. 161-174, 2020.
- CUNHA, J. P. A. R.; CARVALHO, W. P. A. Distribuição volumétrica de aplicações aéreas de agrotóxicos utilizando adjuvantes. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n. 2, p.130-135, 2005.
- DORNELLES, M. E.; SCHLOSSER, J. F.; CASALI, A. L.; BRONDANI, L. B. Inspeção técnica de pulverizadores agrícolas: histórico e importância. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1601-1606, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000133>.
- FELIZARDO, K. R. **Modelagem e controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta**. 2013. 141 f. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia



- de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo, 2013. DOI: <http://doi.org/10.11606/T.18.2013.tde-30092013-134645>.
- FELIZARDO, K. R.; MERCALDI, H. V.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E.; STEWARD, B. L. Modeling and model validation of a chemical injection sprayer system. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 32, n. 3, p. 285-297, 2016. DOI: <http://doi.org/10.13031/aea.32.10606>.
- GONZALEZ, R.; PAWLOWSKI, A.; RODRIGUEZ, C.; GUZMAN, J. L.; SANCHEZ-HERMOSILLA, J. Design and implementation of an automatic pressure-control system for a mobile sprayer for greenhouse applications. Spanish. **Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 4, p. 939-949, 2012.
- JAZAR, R. N. **Vehicle dynamics: theory and application**. Riverdale: Springer, 2008. 1015 p.. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-0-387-74244-1>.
- LEADBEATER, A. Recent developments and challenges in chemical disease control - a review. **Plant Protection Science**, v. 51, n. 4, p. 163-169, 2015. DOI: <http://doi.org/10.17221/83/2015-PPS>.
- MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in Linguistic Synthesis with fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](http://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).
- MAPA. AGROFIT. **Sistemas de agrotóxicos fitossanitários**. Disponível em: [https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons). Acesso em: 30 set. 2022.
- MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. 2. ed. London: Longman, 1992. 405 p.
- MERCALDI, H. V. **Automação de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo. DOI: <http://doi.org/10.11606/D.18.2012.tde-23012013-143643>.
- MERCALDI, H. V.; PENALOZA, E. A.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Controlador preditivo com restrições embarcado. **Anais da Sociedade Brasileira de Automática**, v. 1, n. 1, p. 429-435, 2019.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **The LabVIEW RIO Architecture**: A Foundation for Innovation. National Instruments, 2024. Disponível em <https://www.ni.com/pt-br/innovations/whitepapers/13/the-labview-rio-architecture--a-foundation-for-innovation.html>. Acesso em: 5 out. 2022.
- OLIVEIRA, V.; AGUIAR, M. VARGAS, J. **Engenharia de Controle**: fundamentos e aulas de laboratório. São Paulo: Elsevier Brasil, 2017. 328 p.
- PAWLOWSKI, A.; GUZMÁN, J.; SÁNCHEZ-HERMOSILLA, J.; RODRÍGUEZ, C.; DORMIDO, S. A low-cost embedded controller design for selective spraying vehicle. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 5404-5409, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1074>.
- PECCIN, V. B.; LIMA, D. M.; FLESCHE, R. C. C.; NORMEY-RICO, J. E. Fast generalized predictive control based on accelerated dual gradient projection method. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 1, p. 480-485, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.06.108>.
- PEÑALOZA, E. A. G. *Modelo do erro de taxa de aplicação em função do ângulo de estercamento de um pulverizador tratorizado*. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: SIAGRO, 2014. p. 53-56.
- PEÑALOZA, E. A. G.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Using soft sensors as a basis of an innovative architecture for operation planning and quality evaluation in agricultural sprayers. **Sensors**, v. 21, n. 4, p. 1269, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/s21041269>.
- PEÑALOZA, E. G.; CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; COSTA, A. G. F. A model approach to infer the quality in agricultural sprayers supported by knowledge bases and experimental measurements. **International Journal of Semantic Computing**, v. 11, n. 03, p. 279-292, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1142/S1793351X17400104>.
- PEREIRA, F. J. S. **Sistemas de comutação de pontas na barra de pulverização para ajuste do tamanho de gotas às condições climáticas e aplicação em taxas variáveis**. 2006. 125 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).
- POWLES, S. B. Evolved glifosato-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 360-365, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1002/ps.1525>.
- SCHUTZ, D. R. **Controle preditivo embarcado em um sistema de pulverização agrícola para aplicação em taxa variada**. 2022. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo.
- SCHUTZ, D. R.; MERCALDI, H. V.; PENALOZA, E. A.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. An intelligent fuzzy-GPC control for agricultural sprayers: comparison between GPC and PID fuzzy controllers. In: APCA INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL AND SOFT COMPUTING. 2022, Caparica. **Anais [...]**. Amsterdã: Springer, 2022. p. 272-284. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-031-10047-5\\_24](http://doi.org/10.1007/978-3-031-10047-5_24).
- ROSSITER, J. A. **Model-based predictive control: a practical approach**. 1. ed. Washington, D.C.: CRC Press, 2003.
- SCHUTZ, D. R.; OLIVEIRA, V. A.; MERCALDI, H. V.; PENALOZA, E. A.; CRUVINEL, P. E. Controlador preditivo para uso em pulverizadores agrícolas com simulador operando em hardware-in-the-loop. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI). 2021, Rio Grande. **Anais [...]**. Rio Grande: SBA, 2021.
- SENAR. **Mecanização: operação de pulverizador de barras tratorizado**. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, 2018. 190 p.
- SHIRATSUCHI, L. S.; FONTES, J. R. A. **Tecnologia de aplicação de herbicidas**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 129 p.

- STEWART, B. L.; HUMBURG, D. S. Modeling the raven scs-700 chemical injection system with carrier control with sprayer simulation. **Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers**, v. 43, n. 2, p. 231-245, 2000. DOI: <http://doi.org/10.13031/2013.2698>.
- SUTHERLAND, J. A.; KING, W. J.; DOBSON, H. M.; INGRAM, W. R.; ATTIQUE, M. R.; SANJRANI, W. Effect of application volume and method on spray operator contamination by insecticide during cotton spraying. **Crop Protection**, v. 9, n. 5, p. 343-350, 1990. DOI: [http://doi.org/10.1016/0261-2194\(90\)90004-Q](http://doi.org/10.1016/0261-2194(90)90004-Q).
- SUZUMURA, Y.; CRUVINEL, P. E. Analysis of the quality of the efficiency of agricultural spraying with image processing and neural networks. **Sinergia**, v. 6, p. 129-137, 2005.
- THISTLE, H. W.; TESKE, M. E.; REARDON, R. C. Weather effects on drift meteorological factors and spray drift: An overview. In: NORTH AMERICAN CONFERENCE ON PESTICIDE SPRAY DRIFT MANAGEMENT. 1998, Portland. **Proceedings [...]**. Maine: University of Maine Cooperative Extension, United States Department of Agriculture (USDA), p. 64-74, 1998.
- VONDRICKA, J.; LAMMERS, P. S. Real-time controlled direct injection system for precision farming. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 5, p. 421-430, 2009.
- YASIN, M. Air assisted sleeve boom sprayer. **Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America**, v. 43, p. 61-66, 2012.