

Controlador preditivo para uso em pulverizadores agrícolas com simulador operando em *hardware-in-the-loop*

Deniver Reinke Schutz^{1,4} Vilma A. Oliveira¹ Heitor V. Mercaldi²
Elmer A. G. Penaloza³ Paulo E. Cruvinel⁴

¹ Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP
(e-mail: deniver@usp.br, voliveira@usp.br).

² Universidade Federal de São Carlos (e-mail: heitor@ufscar.br)

³ Universidade Federal de Pelotas (e-mail: eagpenaloza@ufpel.edu.br)

⁴ Embrapa Instrumentação (e-mail: paulo.cruvinel@embrapa.br)

Abstract: In line with the need to increase the productivity in agriculture, several researches have been developed to improve agricultural application techniques for pest control. This paper presents a predictive controller embedded in a direct injection sprayer. A generalized predictive controller (GPC) with constraint algorithms were developed using a Toeplitz and Hankel matrix model which facilitates the implementation in an embedded manner. The main contributions are the modification of the GPAD algorithm (accelerated dual gradient projection) to include a scaling factor reducing the saturation region of the control signal, the use of the Toeplitz and matrix representation Hankel, as well as the use of low-cost hardware-in-the-loop. The results show the efficiency of the GPC applied to a spraying system and its effectiveness in obeying control constraints by means of the PGS (projected Gauss-Seidel) and GPAD algorithms and, encourage new research in agricultural pest control.

Resumo: Alinhados à necessidade de aumentar a produtividade na agricultura, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para melhorar as técnicas de aplicação agrícola para o controle de pragas. Este artigo apresenta um controlador preditivo embarcado em um pulverizador de injeção direta. Foi utilizado um GPC (do inglês *generalized predictive controller*) com um algoritmo de restrição desenvolvido a partir da sua representação matricial na forma Toeplitz e Hankel que facilita a sua implementação embarcada. Como contribuições, destacam-se a modificação do algoritmo GPAD (do inglês *accelerated dual gradient projection*) para a inclusão de um fator de escalonamento visando reduzir a região de saturação do sinal de controle, e a utilização da representação matricial Toeplitz e Hankel, assim como o uso de *hardware-in-the-loop* de baixo custo. Os resultados mostram a eficiência do GPC aplicado ao sistema de pulverização e a sua eficácia no atendimento das restrições por meio dos algoritmos PGS (do inglês *projected Gauss-Seidel*) e GPAD e, incentivam novas pesquisas em automação no combate às pragas agrícolas.

Keywords: GPC controller; Control saturation; Algorithms PGS and GPAD; Toeplitz and Hankel's matrices.

Palavras-chaves: Controlador GPC; Saturação de controle; Algoritmo PGS e GPAD; Matriz de Toeplitz e Hankel.

1. INTRODUÇÃO

A pulverização agrícola tem um papel relevante para manter as taxas de produção e produtividade das lavouras nos dias atuais. Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU), apresentados em MAPA (2019), sem a aplicação de agrotóxicos, 40% de toda a produção mundial de alimentos seria perdida devido a pragas e doenças. Por outro lado, o custo dos agrotóxicos pode representar até 30% dos custos de produção. Desta forma, a agricul-

tura de precisão, um sistema de gestão caracterizado pelo uso extensivo da tecnologia como máquinas agrícolas com eletrônica embarcada, sistemas de navegação global via satélite (GNSS) e sistemas de informação geográfica (GIS), tem como propósito otimizar recursos, diminuir custos e aumentar a produção agrícola visando garantir a sustentabilidade ambiental baseada na variabilidade espacial dos atributos da lavoura (Tschiedel and Ferreira, 2002; Oerke et al., 2010).

A utilização de pulverizadores agrícolas com injeção direta de agrotóxicos permite realizar a aplicação em taxa variada possuindo reservatórios separados para a água e

* Esta pesquisa contou com o suporte do CNPq processo 305892/2017-7.

o agrotóxico, o que implica uma redução significativa da calda (mistura de agrotóxico e diluente, em geral água) excedente ao final da aplicação, capacidade de variação da concentração da mistura e a aplicação de diferentes agrotóxicos conforme a necessidade da lavoura. A regulação da taxa de aplicação dos pulverizadores de barra é realizada através de válvulas proporcionais do tipo agulha, borboleta ou esfera (Steward and Humburg, 2000; Felizardo et al., 2016) e os controladores de pulverização comerciais apresentam tempo de resposta entre 0,5 a 2 s e o tempo de atraso típico é de 1 s (J. Bennur and K. Taylor, 2010).

Os controladores de pulverização são em sua grande maioria do tipo proporcional integral e ou derivativa (PID), em sua forma clássica ou com alterações como o escalonamento dos ganhos para atender critérios de desempenho (Steward and Humburg, 2000; J. Bennur and K. Taylor, 2010). Resultados experimentais para a regulação de vazão ou pressão em pulverizadores agrícolas, demonstram sucesso no uso de controladores PIDs clássicos e por escalonamento dos ganhos utilizando sistemas fuzzy, ou através da inclusão de uma função não linear para sintonia dos ganhos do controlador PID (Mercaldi, 2012; Gonzalez et al., 2012; Pawlowski et al., 2017).

Nos últimos anos, trabalhos têm sido desenvolvidos voltados para a regulação da vazão da calda através do uso dos controladores preditivos. Em Felizardo et al. (2013) é abordado o uso de controle preditivo baseado em modelo (MPC, do inglês *model predictive control*) para regulação da vazão em um pulverizador de injeção direta, através do modelo espaço de estado. Mercaldi et al. (2018) apresentam o desenvolvimento e implementação embarcada em microcontrolador de um controlador preditivo generalizado (GPC, do inglês *generalized predictive control*) sujeito a restrições aplicado ao módulo de injeção de um pulverizador. Uma das vantagens do controle preditivo é a possibilidade do tratamento de restrições que podem ser incorporadas intrinsecamente no projeto do controlador através do uso de um algoritmo na etapa de otimização da função custo.

Este artigo, apresenta a avaliação em ambiente de simulação *hardware-in-the-loop* (HIL) de um GPC sujeito a restrições operando em um pulverizador. O controlador atua em uma válvula proporcional para regular a vazão de calda. Para isso, são avaliados dois métodos de otimização para obtenção da lei de controle: o método *projected Gauss-Seidel* (PGS) e o método *accelerated dual gradient projection* (GPAD). Ambos permitem o tratamento de restrições relacionadas aos limites físicos da válvula proporcional. Como contribuições é proposto uma modificação do algoritmo GPAD de Peccin et al. (2019) para incluir um fator de escalonamento capaz de variar o tamanho do passo do algoritmo de otimização, influenciando a região de saturação na ação de controle, e utilizar a representação matricial de Toeplitz e Hankel.

2. CONTROLADOR GPC

Inicialmente proposto por Clark et al. (1987), o GPC é uma das mais difundidas técnicas de controle preditivo na indústria, apresentando ótimo desempenho e considerável robustez. A formulação do GPC é baseada no modelo

CARIMA (do inglês *controlled auto-regressive integrated moving average*), apresentado em sua forma polinomial incremental:

$$A(z)\Delta y(k) = B(z)\Delta u(k)T(z)\varepsilon(k) \quad (1)$$

com

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

$$B(z) = b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}$$

$$T(z) = t_1 + t_2z^{-1} + \dots + t_{n_t}z^{-n_t}$$

em que $A(z)$ e $B(z)$ são polinômios de ordem n_a e n_b respectivamente, que capturam a dinâmica da planta, $T(z)$ é um polinômio de projeto geralmente empregado como um filtro passa baixa, $\Delta = 1 - z^{-1}$, $\varepsilon(k)$ um ruído branco de média nula, $y(k)$ é a saída e $u(k)$ a ação de controle. Em (1), faz-se $A(z)\Delta = \tilde{A}(z)$ obtendo-se:

$$\tilde{A} = 1 + \tilde{a}_1z^{-1} + \tilde{a}_2z^{-2} + \dots + \tilde{a}_{n_a}z^{-n_a+1}. \quad (2)$$

A partir do modelo CARIMA (1) são encontrados o modelo de predição (ou preditor). O modelo de predição pode ser encontrado por meio das equações diofantinas ou utilizando a representação matricial de Toeplitz e Hankel (Rossiter, 2003). Esta última torna o processo de obtenção da lei de controle mais intuitivo e muitas vezes facilita a implementação embarcada. O preditor é responsável por prever as saídas futuras do sistema e o modelo matricial é dado por:

$$\underset{\rightarrow}{y}(k+1) = H \underset{\rightarrow}{\Delta u}(k) + P \underset{\leftarrow}{\Delta u}(k-1) + Q \underset{\leftarrow}{y}(k) \quad (3)$$

em que na notação, os vetores identificadas com setas y e Δu apontando para esquerda e direita são, respectivamente, elementos passados e futuros e representam o primeiro elemento dos vetores:

$$\underset{\rightarrow}{y}(k+1) = \begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+N_p) \end{bmatrix}, \quad \underset{\rightarrow}{\Delta u}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k-1+N_p) \end{bmatrix}$$

$$\underset{\leftarrow}{y}(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k-1) \\ \vdots \\ y(k-n_a) \end{bmatrix}, \quad \underset{\leftarrow}{\Delta u}(k-1) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \Delta u(k-2) \\ \vdots \\ \Delta u(k-n_b+1) \end{bmatrix},$$

com $H = C_A^{-1}C_b$, $P = C_A^{-1}H_b$ e $Q = -C_A^{-1}H_A$ matrizes de ordem $N_p \times N_p$, $N_p \times n_b$ e $N_p \times n_a$ em que C_b , H_b , H_A e C_A são matrizes de ordem $N_p \times N_p$, $N_p \times n_b$, $N_p \times n_a$ e $N_p \times N_p$, respectivamente, obtidas através dos polinômios $\tilde{A}(z)$ e $B(z)$ do modelo CARIMA e N_p o horizonte de predição e

$$H_A = \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 & \tilde{a}_2 & \dots & \tilde{a}_{n_a} & \tilde{a}_{n_a+1} \\ \tilde{a}_2 & \tilde{a}_3 & \dots & \tilde{a}_{n_a+1} & 0 \\ \tilde{a}_3 & \tilde{a}_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$C_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{a}_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{a}_2 & \tilde{a}_1 & 1 & \dots & 0 \\ \tilde{a}_3 & \tilde{a}_2 & \tilde{a}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad C_b = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & 0 & \dots & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & \dots & 0 \\ b_4 & b_3 & b_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$H_b = \begin{bmatrix} b_2 & b_3 & \cdots & b_{nb-1} & b_{nb} \\ b_3 & b_4 & \cdots & b_{nb} & 0 \\ b_4 & b_5 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}.$$

Analisando (3), tem-se que a mesma é dependente das saídas passadas as quais podem ser medidas pelos sensores da planta e armazenados na memória, das entradas passadas executadas pelo controlador e das entradas futuras as quais são obtidas pela lei de controle GPC a ser calculada através do processo de minimização de uma função custo. Na formulação do GPC opta-se pela utilização de uma função custo quadrática, pois fornece boas condições de otimização, com um mínimo único e comportamentos geralmente mais suaves. A ação de controle é encontrada através da minimização da função custo até o horizonte de controle N_c , assumindo que após esse ponto os incrementos de controle serão nulos (Rossiter, 2003).

Para sistemas com uma entrada e uma saída considera-se a seguinte função custo quadrática

$$J(\Delta u, e) = \sum_{k=1}^{N_p} \delta (e_{\rightarrow}(k+1))^2 + \sum_{k=1}^{N_c} \lambda (\Delta u_{\rightarrow}(k))^2 \quad (4)$$

em que δ é um fator de ponderação do erro, e é o erro e λ é o fator de ponderação dos incrementos de controle Δu .

O problema de otimização é então formulado como segue:

$$\min_{\Delta u(k)} J(\Delta u, e)$$

sendo a lei de controle obtida como:

$$\Delta u(k) = P_r r_{\rightarrow}(k+1) - D_k \Delta u_{\leftarrow}(k-1) - N_k y_{\leftarrow}(k) \quad (5)$$

adotando-se $P_r = E_1^T (\delta H^T H + \lambda I)^{-1} \delta H^T$, $D_k = P_r P$ e $N_k = P_r Q$ com $E_1^T = [I \ 0 \ \cdots \ 0]$ expressando que somente o primeiro termo $\Delta u(k)$ da trajetória de controle $\Delta u_{\rightarrow}(k)$ é implementada na entrada da planta.

A lei de controle (5) pode ser simplificada de modo que os cálculos sejam realizados apenas até o horizonte de controle, reduzindo custos operacionais (Mercaldi, 2018):

$$\Delta u(k) = -E_1^T S^{-1} a \quad (6)$$

em que $S = \delta H_1^T H_1 + \lambda I$, sendo $H_1 = H(1 : N_p, 1 : N_c)$ e $a = X * \left[\Delta u_{\leftarrow}(k-1) \ y_{\leftarrow}(k) \ r_{\rightarrow}(k+1) \right]^T$, $X = [\delta H_1^T P \ \delta H_1^T Q \ -\delta H_1^T L]$ e $L = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]^T$.

2.1 Implantação do polinômio T

Por utilizar as saídas da planta para obter o modelo de predição, a lei de controle do GPC tem como característica ser muito sensível a ruído de medida. A alternativa mais usual é a implantação de um filtro passa baixa, o qual essencialmente filtra as altas frequências, demonstrando ser eficaz desde as primeiras pesquisas do GPC. Ao utilizar o modelo CARIMA é possível incluir facilmente efeitos de distúrbio no processo (Rossiter, 2003). A partir de (1), considerando um ruído branco $\varepsilon(k)$ e o polinômio $T(z) \neq 0$ e $\delta = 1$, o preditor (3) e a lei de controle (5) podem ser reescritas, respectivamente, como:

$$y_{\rightarrow}(k+1) = H \Delta u_{\rightarrow}(k) + \tilde{P} \Delta \tilde{u}_{\leftarrow}(k-1) + \tilde{Q} \tilde{y}_{\leftarrow}(k) \quad (7)$$

$$\Delta u(k) = P_r r_{\rightarrow}(k+1) - \tilde{D}_k \Delta u_{\leftarrow}(k-1) - \tilde{N}_k y_{\leftarrow}(k) \quad (8)$$

em que $\tilde{u} = u/T$, $\tilde{y} = y/T$, $\tilde{P} = [C_T + P - HH^T]$ e $\tilde{Q} = [C_T Q + H_T]$ com $P_r = E_1^T (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T$, $\tilde{D}_k = P_r \tilde{P} P$, $N_k = P_r \tilde{Q}$ e, H_T e C_T , $N_p \times n_t$ e $N_p \times N_p$ e a representação matricial na forma de Toeplitz e Hankel do polinômio $T(z)$, apresentado em (1), como segue:

$$H_T = \begin{bmatrix} t_2 & t_3 & \cdots & t_{nt-1} & t_{nt} \\ t_3 & t_4 & \cdots & t_{nt} & 0 \\ t_4 & t_5 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad C_T = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ t_2 & t_1 & 0 & \cdots & 0 \\ t_3 & t_2 & t_1 & \cdots & 0 \\ t_4 & t_3 & t_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}.$$

$T(z)$ é um polinômio projetado como um filtro passa baixa e tem como objetivo melhorar a resposta em malha fechada.

2.2 Restrições

Nessa seção é desenvolvido o modelo matricial proposto por Rossiter (2003) das restrições na ação de controle, as quais posteriormente são introduzidas na estratégia de controle do GPC.

As restrições podem ser classificadas em três tipos: rígida, flexível e terminal. A rígida é a restrição que precisa ser satisfeita, as válvulas utilizadas nesse trabalho são um exemplo prático, pois possuem limites físicos de abertura e fechamento do êmbolo, sendo que sinais de controle que direcionam acima desse limite não trazem variações no sistema. A restrição flexível estabelece faixas de operação onde os limites podem ser ultrapassados caso necessário, desde que a estabilidade do sistema não seja comprometido, como é o caso de restrições relacionadas ao problema de fadiga dos atuadores. Por fim, a restrição terminal é imposta a fim de garantir estabilidade ou devido as próprias condições de operação do sistema. De acordo com Camacho and Bordons (2013) o problema de otimização é dito como factível, quando a função objetivo é limitada e possui um conjunto de pontos em seu estado de decisões que satisfaz todas as restrições.

As restrições na ação de controle podem ser escritas como:

$$\bar{u} \leq \underline{u}_{\rightarrow}(k) \leq u \quad (9)$$

em que \underline{u} e \bar{u} definem uma o limite inferior e superior da entrada, respectivamente. A restrição (9) pode ser simplificada como:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix}}_{C_u} u_{\rightarrow}(k) - \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{u} \\ -u \end{bmatrix}}_{r_u} \leq 0 \quad (10)$$

Como a lei de controle (6) é descrita em termos dos incrementos de controle Δu é necessário que as matrizes de restrição também sejam expressas em termos de Δu . Sabe-se que a i -ésima ação de controle pode ser representada em função dos incrementos de controle, conforme a seguir:

$$u(k+i) = u(k-1) + \Delta u(k) + \cdots + \Delta u(k+i). \quad (11)$$

Portanto, pode-se reescrever as predições de entrada em termos dos incrementos de controle futuros:

$$u(k) \rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{M_E} \Delta u(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}}_{M_L} u(k-1). \quad (12)$$

Substituindo (12) em (10) tem-se a matriz de restrição na ação de controle dada por:

$$\underbrace{[C_u M_E]}_C \Delta u(k) \leq \underbrace{r_u - [C_u M_L]}_{r_t} u(k-1). \quad (13)$$

3. ALGORITMO GPAD PARA O GPC

Em geral, para o tratamento das restrições, o controle preditivo MPC necessita realizar o cálculo de um problema de programação quadrática em cada período de amostragem, o que muitas vezes limita sua utilização em sistemas de altas taxas de amostragem. Segundo Peccin et al. (2019), uma das maneiras de solucionar esse problema é a utilização de algoritmos especiais embarcados em *hardwares* de alta velocidade. Vários são os trabalhos que propõem algoritmos para incorporar as restrições e na sua grande maioria são voltados para a formulação em espaço de estado.

Uma vez que o objetivo é embarcar o controlador GPC para controle de vazão de calda de um pulverizador agrícola de injeção direta, se faz necessário um algoritmo de programação quadrática capaz de restringir as ações de controle devido aos limites físicos da válvula proporcional, caracterizando uma restrição rígida. No contexto de buscar um algoritmo de baixa complexidade, que possa ser embarcado em microcontrolador e que exija pouca memória e rápido tempo de respostas, dois métodos mostram-se favoráveis: o PGS apresentado em Mercaldi et al. (2018) e o GPAD proposto por Peccin et al. (2019).

O Algoritmo 1 apresenta uma modificação do algoritmo de Peccin et al. (2019) para utilizar a representação por matrizes Toeplitz e Hankel no problema de minimização do GPC. Possui como entrada as matrizes S e a definidas em (5), provenientes do modelo Toeplitz e Hankel, e as matrizes de restrição C e o termo r_t , provenientes de (13). Os parâmetros int_{max} e e_0 representam nessa ordem, o número máximo de interações e a tolerância residual, sendo utilizados como critérios de parada do algoritmo. Neste trabalho, é proposto a adição de um parâmetro α ao algoritmo desenvolvido por Peccin et al. (2019). Esse parâmetro atua como um fator de ponderação quanto ao tamanho do passo na direção de descenso, variando entre $0 < \alpha \leq 1$. Os efeitos de sua implantação na região de platô de saturação são ilustrados na Seção 6.

4. MÓDULO DE PULVERIZAÇÃO

O sistema da bancada, utilizada neste trabalho, é análogo a um pulverizador de injeção direta, cuja principal característica é a presença de dois tanques, um para o diluente e o outro para a água, misturados no momento da aplicação. É qualificado como um sistema flexível, pois permite aplicar produtos diferentes ao mesmo tempo, possibilitando a aplicação variada da concentração da calda e da taxa (Vondricka and Lammers, 2009; Felizardo, 2013).

Algorithm 1 Accelerated dual gradient projection - GPAD

Input: $S, C, r_t, a, int_{max}, e_0, \alpha$
Output: Δu
 $\phi = \phi^{-1} = 0, \text{flag}=\text{true};$
 $L = \sqrt{\sum_{i,j=1}^n |C S^{-1} C^T|} * \alpha$ {Norma de Frobenius}
while $j < int_{max}$ & **flag do**
 if $j = 0$ **then**
 $\Gamma = 0;$
 else
 $\Gamma = \frac{j-1}{j+2};$
 end if
 $w = \phi_j + \Gamma(\phi_j - \phi_{j-1});$
 $\Delta u = -S^{-1}(C^T w + a);$
 $s = \frac{1}{L}(C \Delta u - d_t);$
 if $j \neq 0$ & $w^T s < e_0/L$ **then**
 $\text{flag}=\text{false};$
 end if
 $\phi(j+1) = \max(w + s, 0);$
 $j = j + 1;$
end while

A modelagem da planta é apresentada em Cruvinel et al. (2016), Felizardo et al. (2013) e Mercaldi (2018), sendo dividida em dois módulos: injeção e pulverização. A Figura 1 apresenta os componentes constituintes do módulo de pulverização, o qual, em conjunto com o atuador, é responsável por regular a taxa de aplicação via controle de vazão de calda.

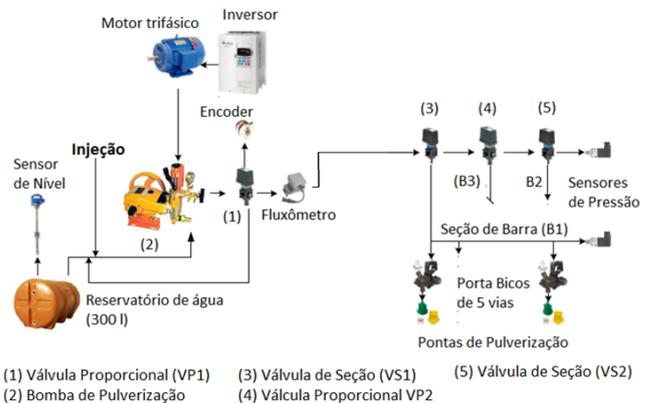


Figura 1. Módulo de pulverização - esquema com sistema de injeção direta central. (Adaptado de Mercaldi (2012)).

A bomba de pulverização utilizada é do tipo pistão modelo MB-42 Jacto e tem como finalidade captar a água de reservatório de 300l para atuar como diluente, enviando ao sistema hidráulico e bombeando a calda para os bicos. Possui capacidade máxima de 4000 kPa de pressão e 42l/min. Um motor trifásico, acionado por um inversor trifásico, mantém constante a vazão da bomba. Sensores de nível são acoplados ao tanque de modo a evitar danos físicos à bomba, causados por falta de água e capacidade máxima do reservatório.

Uma válvula proporcional de três vias denotada V_{P1} do tipo agulha, modelo 463022S da ARAG, é o principal atuador do sistema para regular a vazão de calda. Possui capacidade de controlar vazões de até 150l/min com uma

pressão máxima de 2000 KPa e um tempo de resposta de 7s. Seu êmbolo é acionado por um motor de corrente contínua, acoplado a uma ponte H utilizada para controlar a posição do êmbolo ($0 \leq \theta_{vp} \leq 94,2 \text{ rad}$) e o sentido de rotação (abertura ou fechamento da válvula) através de sinais de PWM. A posição da válvula é medida com o auxílio de um *encoder*. Válvulas solenoides de retorno automática, denotadas V_{S1} , V_{S2} e V_{S3} , são usadas para fazer o direcionamento da vazão para as barras de seção do sistema (Mercaldi, 2018).

A vazão da calda é medida por um fluxômetro eletromagnético (modelo 4621AA30000, empresa ORION), possui uma faixa de medição entre 5 a 100l/min, suportando pressões de até 40 bar. Dois sensores de pressão piezoelétricos, modelo A-10 da WICA, são acoplados ao sistema; um monitora a pressão da barra de distribuição e o outro a pressão no final da barra B1. No final das barras de seção são acoplados porta bicos de cinco vias, responsáveis pela formação das gotas de pulverização.

A modelagem matemática do módulo de pulverização proposta por Felizardo (2013) é baseada na resistência fluidica dos componentes (tubulações, bicos e válvulas). A Figura 2 a) apresenta o diagrama de blocos do módulo de pulverização. A válvula proporcional denotada V_{P1} é composta pelo motor CC com ponte H, apresentado na Figura 2 b). A resistência fluidica da válvula proporcional denotada K_{VP} é dada em função da posição θ_{VP} do êmbolo obtida através de leituras de pressão e vazão para diferentes posições θ_{VP} , obtendo-se como resultado os valores dos parâmetros α_0 , α_1 e β . Através da relação hidráulica do módulo de pulverização é encontrada a vazão de saída Q_F do sistema em que Q_B é a vazão da bomba de pulverização, K_{Teq} a resistência equivalente do sistema hidráulico e τ_F o tempo de resposta devido a movimentação da calda na tubulação. Através da vazão de calda pode-se ainda encontrar de forma indireta a pressão da barra de pulverização denotada p_S .

A partir do modelo mostrado na Figura 2, pode ser obtida a resposta ao degrau e o modelo discreto auto-regressivo de média móvel com entrada exógena (ARMAX) da planta. Utilizando 14 pontas de pulverização com bicos modelo 422SFC11005-ARAG e um período de amostragem de 300 ms é obtido o seguinte modelo em malha aberta aproximado (Mercaldi, 2018):

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) \quad (14)$$

em que

$$A(z) = 1 - 1,467z^{-1} + 0,2452z^{-2} + 0,2222z^{-3}$$

$$B(z) = 0,00277z^{-3} + 0,0001954z^{-4}.$$

Esse modelo é utilizado no projeto do controlador GPC e para a simulação *hardware-in-the-loop* discutida na seção seguinte.

5. SIMULAÇÃO *HARDWARE-IN-THE-LOOP*

A simulação HIL mostra-se promissora, principalmente por ser uma estratégia de baixo custo capaz de capturar e respostas e dinâmicas do sistema sobre diferentes pontos de operação, sem a necessidade do acionamento do sistema

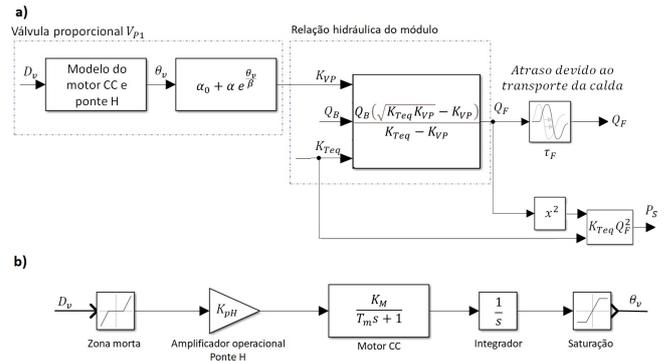


Figura 2. Diagrama de blocos do modelo da planta a) módulo de pulverização com uma válvula proporcional e b) modelo de motor CC e acionamento composto por uma zona morta Z_{Mv} , um ganho do amplificador de potência denotado K_{pH} e um bloco de saturação para limitar o curso do êmbolo da válvula proporcional com limite inferior $\theta_{vmin} = 0 \text{ rad}$, quando a válvula está totalmente aberta e limite superior $\theta_{max} = 94,2 \text{ rad}$, para totalmente fechada. O integrador se faz necessário pois se injetado um sinal de entrada PWM com *duty cycle* D_V abrindo ou fechando a válvula, quando cessado, a mesma permanece em sua posição, sendo necessário um sinal contrário para o êmbolo retornar a sua posição original. (Adaptado de Felizardo (2013)).

físico real. Além de permitir a avaliação individual de algoritmos, componentes e *softwares* (Lopes, 2017).

A Figura 3 apresenta o esquema da simulação HIL. O controlador é embarcado à uma placa STM32F407-Discovery da STMicroelectronics, escolhida por apresentar alta capacidade de memória, microcontrolador ARM, operar sobre velocidades de *clock* de até 168 MHz, possuir controladores para redes CAN (de *controller area network*), contadores, temporizadores e pode ser facilmente configurada através das plataformas STM32CubeMX e CubeIDE, disponibilizada gratuitamente pelo fabricante, além de ser de baixo custo.

Foi configurado um temporizador que gera uma interrupção acionando uma função que implementa os sinais de controle no módulo de pulverização, esse embarcado através do modelo ARMAX (14). Os valores da entrada de controle D_v e da resposta da planta Q_F são enviados via comunicação USB para uma *Host PC* (Dell-Inspiron 5558 Intel® Core™ i7-5500U CPU2.40GHz) que são interpretados graficamente pelas plataformas CubeIDE ou STMStudio, disponibilizadas pela fabricante da placa. O clock foi configurado para 16 MHz. A Figura 4 apresenta o experimento realizado para a simulação HIL. Através desse experimento é possível verificar a eficácia do algoritmo de controle proposto e do STM32F407 utilizando-se poucos equipamentos. Devido a arquitetura adotada na simulação HIL não foi possível testar os canais de comunicação do hardware, no entanto pode-se avaliar características como tempo de processamento e capacidade de memória.

6. RESULTADOS

Para testar o algoritmo a ser embarcado para a simulação HIL, uma simulação foi realizada no MatLab, utilizando

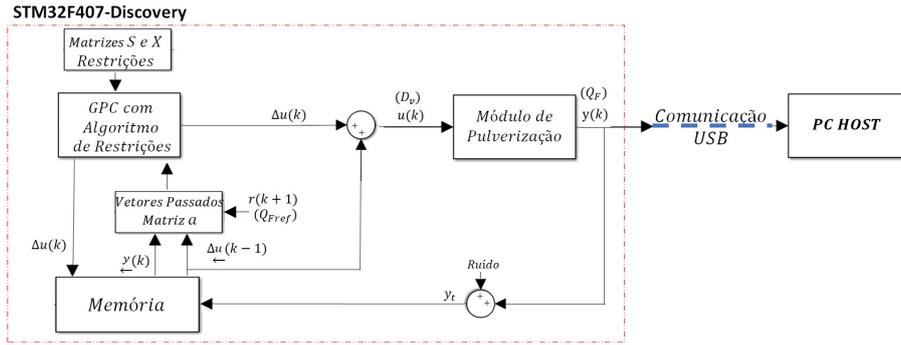


Figura 3. Estratégia de simulação *hardware-in-the-loop*.

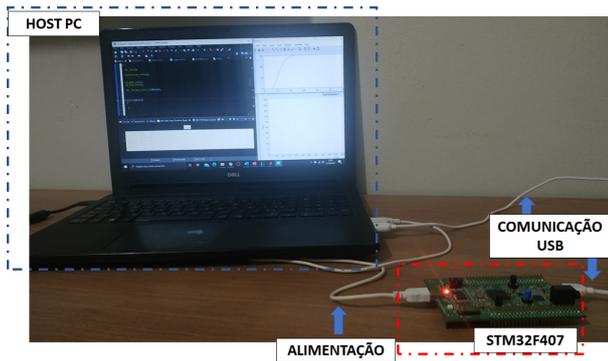


Figura 4. Experimento para a simulação *hardware-in-the-loop*. O controlador GPC e o modelo matemático do módulo de pulverização são embarcados na placa STM32F407. O sinal de controle D_v e a saída Q_F são apresentados graficamente no PC Host.

o modelo em malha aberta da planta de pulverização, apresentado em (14), implementando um controlador tipo GPC com três diferentes formas de tratamento de uma restrição rígida na ação de controle: através da função *quadprog*, disponível no software MatLab, por meio do algoritmos PGS e GPAD. As entradas são restringidas em $D_{vmax,min} = |100|$, advindas dos limites físicos da válvula proporcional. Como entrada de referência, foi utilizado um degrau de 15 l/min, sabendo que o mesmo por ter uma variação brusca de valores tendia à saturação. Em seguida, após 20s, a referência é elevada para 20 l/min afim de se testar o algoritmo com variações leves de referência, por fim, após cerca de 42s a referência decai para 15 l/min. Os resultados são apresentados na Figura 5.

Na Figura 5, pode-se observar que o controlador GPC apresenta um bom desempenho em seguir a referência. Também é evidente, a necessidade de incorporar as restrições na estratégia de controle. Os algoritmos PGS e GPAD com $\alpha = 1$ apresentam desempenho em seguir a referência parecidos com o *QuadProg*. Todos os algoritmos obedecem o critério de parada por tolerância $\epsilon_0 = 0,1$ e não extrapolam o número máximo de iterações $int_{max} = 300$. Os parâmetros utilizados foram $N_p = 20$, $N_c = 3$, $\lambda = 1$ e $\delta = 15$ em que N_p é escolhido de modo a ser maior que o tempo de estabilização e ser capaz de gerar boas previsões, já N_c deve ser escolhido de modo a corrigir o erro de regime estacionário e por fim os parâmetros λ e δ são ajustados para garantir um reduzido tempo de resposta e sobressinal. As matrizes S e a são dadas por:

$$S = \begin{bmatrix} 2,42 & 1,28 & 1,15 \\ 1,28 & 2,16 & 1,04 \\ 1,15 & 1,04 & 1,93 \end{bmatrix}, \quad a = X \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ y(k) \\ r(k+1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

com

$$X^T = \begin{bmatrix} 1,57 & 1,41 & 1,25 \\ 1,71 & 1,54 & 1,37 \\ 1,86 & 1,67 & 1,48 \\ 0,12 & 0,11 & 0,10 \\ 679,89 & 608,03 & 538,54 \\ -947,66 & -848,41 & -752,23 \\ 143,61 & 128,83 & 114,45 \\ 140,06 & 125,45 & 111,28 \\ -15,90 & -13,90 & -12,05 \end{bmatrix}$$

O PGS apresentou uma característica de priorizar o desempenho, o que aumenta a região de saturação na ação de controle. O GPAD com $\alpha = 0.2$ diminuiu consideravelmente a região de saturação, porém, o desempenho em seguir a referência é levemente prejudicado. Ainda na Figura 5, os trechos após 20s, com variação leve de referência, demonstram que a utilização dos três métodos de tratamento de restrições não influenciam o desempenho do controlador na região restringida.

6.1 Resultado da simulação HIL

A Figura 6 apresenta os resultados da simulação HIL gerados a partir da estratégia descrita na Seção 5. Como entrada de referência foi utilizado um degrau de 15 l/min. Foi adicionado um ruído branco de média nula simulando leituras ruidosas advindas do sinal do fluxômetro, afim de testar a eficiência da adição do polinômio $T(z)$ na estratégia do controlador GPC. O ruído foi obtido através da função *wgn* do MatLab. Os parâmetros de sintonia são os mesmos utilizados pela simulação através do software MatLab. Para o caso sem filtro $T(z)$ são obtidos as mesmas matrizes descritas em (15). Utilizando um polinômio $T = 1 - 0.8z^{-1}$ somente a matriz X é alterada para:

$$X^T = \begin{bmatrix} 1,56 & 1,41 & 1,26 \\ 0,46 & 0,41 & 0,36 \\ 0,49 & 0,43 & 0,38 \\ 0,03 & 0,03 & 0,02 \\ 175,61 & 156,36 & 137,88 \\ -247,53 & -220,56 & -194,64 \\ 38,32 & 34,2 & 30,23 \\ 36,77 & 32,78 & 28,94 \\ -15,9 & -13,90 & -12,05 \end{bmatrix} \quad (16)$$

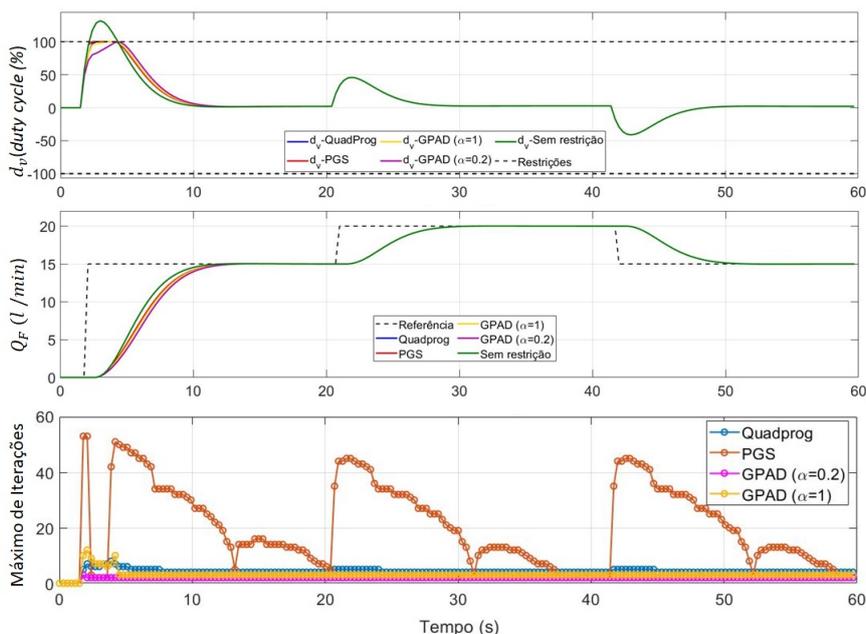


Figura 5. Comparação entre a função Quadprog, o algoritmo PGS e o método GPAD com $\alpha = 1$ e $\alpha = 0.2$.

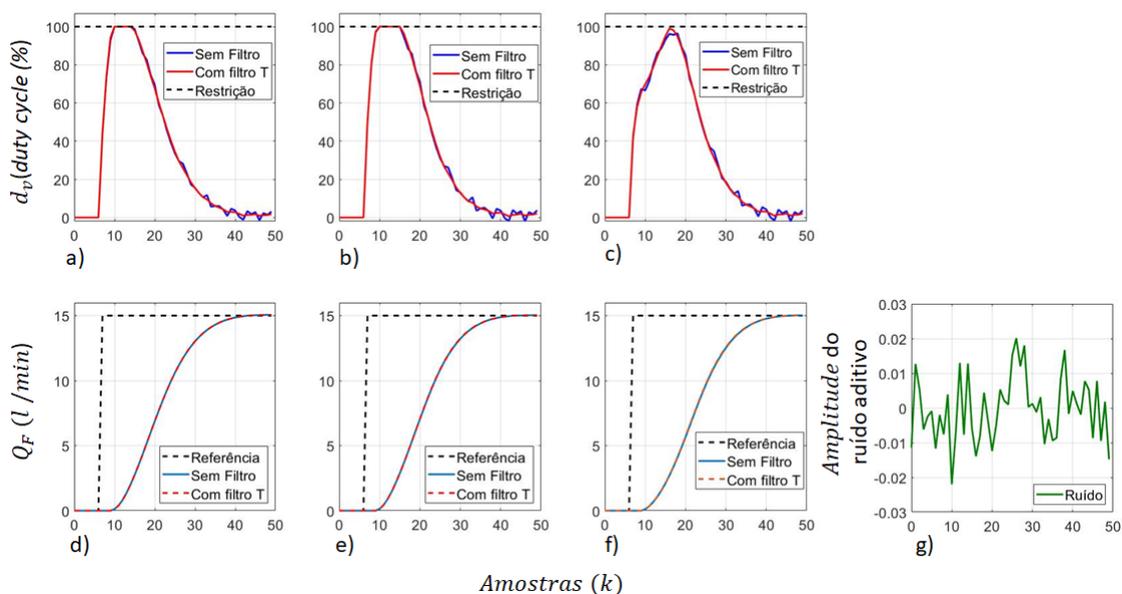


Figura 6. Resultado da simulação HIL do GPC com os algoritmos PGS e GPAD: a) b) e c) são as entradas utilizando o PGS, GPAD $\alpha = 1$ e $\alpha = 0.2$, gerando como saídas d), e), f), respectivamente, e g) O ruído aditivo.

Na Figura 6 é possível observar a importância da implementação do polinômio $T(z)$ para a atenuação de sinais ruidosos advindos das saídas, uma vez que esses influenciam diretamente a lei de controle. O diagrama temporal das tarefas executadas durante a interrupção é mostrado na Figura 7.

7. CONCLUSÃO

Alinhado à necessidade do aumento da produtividade agrícola e a qualidade socioambiental no campo, vários projetos vêm sendo desenvolvidas voltadas ao avanço tecnológico nessa área, dentre esses, o processo de pulverização de agrotóxicos. Esta pesquisa discute a eficiência do controlador GPC para o controle de vazão do sistema de

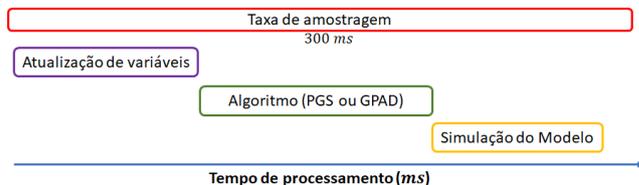


Figura 7. Os tempos médio de processamento do GPC embarcado ao STM32F407-Discovery através do HIL para o PGS e GPAD ($\alpha = 1$ e $\alpha = 0,2$) são respectivamente, 13, 14 e 13 ms. Os tempos críticos de processamento são aproximadamente 49,3, 50 e 38 ms

pulverização. Neste trabalho ainda é abordado a questão de saturação na ação de controle devido a implementação dos algoritmos de tratamento de restrição, o qual é pouco abordado hoje na literatura.

Através do *hardware-in-the-loop* foi possível verificar a eficiência do algoritmo de controle e da placa STM32F4-Discovery, apresentando-se ainda como uma estratégia de baixo custo e flexível. Para tratamento das restrições na ação de controle foi implantado junto ao controlador GPC, os algoritmos PGS e GPAD, ambos mostraram ser eficientes para seguir a referência em que o primeiro prioriza o desempenho e o segundo, com o acréscimo do parâmetro α , busca evitar efeitos de saturação. O algoritmo de implementação do método GPAD apresentado, utiliza as matrizes de Toeplitz e Hankel em sua constituição ao invés das equações *diophantinas*, mais comuns na literatura. Esse modelo matricial facilita o processo de implementação embarcado do GPC no microcontrolador, uma vez que podem ser obtidas a priori através de *softwares* de programação matemática. A implementação do polinômio $T(z)$ como um filtro, mostrou-se eficiente no processo de atenuação de ruídos.

REFERÊNCIAS

- Camacho, E.F. and Bordons, C. (2013). *Model predictive control*. Springer Science & Business Media, London.
- Clark, D., Mohtadi, C., Tuffs, P., et al. (1987). Generalized predictive control—part i: The basic algorithm. *Automatica*, 23(2), 137–148.
- Cruvinel, P.E., Oliveira, V.A., Mercaldi, H.V., Penaloza, E.A., Felizardo, K.R., and Yurish, S.Y. (2016). An advanced sensors-based platform for the development of agricultural sprayers. In *Sensors and Applications in Measuring and Automation Control Systems*, volume 4, 181–204. International Frequency Sensor Association Publishing.
- Felizardo, K.R., Mercaldi, H.V., Oliveira, V.A., Cruvinel, P.E., and Steward, B.L. (2016). Modeling and model validation of a chemical injection sprayer system. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(3), 285–297.
- Felizardo, K.R., Mercaldi, H.V., Oliveira, V.A., and Cruvinel, P.E. (2013). Modeling and predictive control of a variable-rate spraying system. In *2013 8th EURO-SIM Congress on Modelling and Simulation*, 202–207. Cardiff, UK.
- Felizardo, K.R. (2013). *Modelagem e controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Gonzalez, R., Pawlowski, A., Rodriguez, C., Guzman, J.L., and Sanchez-Hermosilla, J. (2012). Design and implementation of an automatic pressure-control system for a mobile sprayer for greenhouse applications. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(4).
- J. Bennur, P. and K. Taylor, R. (2010). Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system. *ASABE - Applied Engineering in Agriculture*, 26(6), 1069–1075.
- Lopes, A.M.R. (2017). *Aplicação da simulação Hardware in the Loop para testes e desenvolvimento de suspensões veiculares*. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.
- MAPA (2019). Projeções do agronegócio: Brasil 2018/2019 a 2028/2029.
- Mercaldi, H.V., Peñaloza, E.A., Oliveira, V.A., and Cruvinel, P.E. (2018). Controlador preditivo com restrições embarcado. In *Anais do XXII Congresso Brasileiro de Automática*, volume 1. SBA.
- Mercaldi, H.V. (2012). *Automação de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade de São Paulo.
- Mercaldi, H.V. (2018). *Controle Preditivo Embarcado para um Pulverizador Agrícola Terrestre*. Ph.D. thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade de São Paulo.
- Oerke, E.C., Gerhards, R., Menz, G., and Sikora, R.A. (2010). *Precision crop protection - the challenge and use of heterogeneity*, volume 5. Springer, Boon.
- Pawlowski, A., Guzmán, J., Sánchez-Hermosilla, J., Rodríguez, C., and Dormido, S. (2017). A low-cost embedded controller design for selective spraying vehicle. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 5404 – 5409. 20th IFAC World Congress.
- Peccin, V.B., Lima, D.M., Flesch, R.C.C., and Normey-Rico, J.E. (2019). Fast generalized predictive control based on accelerated dual gradient projection method. *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 480–485.
- Rossiter, J.A. (2003). *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press, Washington, D.C.
- 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.
- Tschiedel, M. and Ferreira, M.F. (2002). Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. *Ciência Rural*, 32(1), 159–163.
- Vondricka, J. and Lammers, P.S. (2009). Evaluation of a carrier control valve for a direct nozzle injection system. *Biosystems engineering*, 103(1), 43–48.