

# Modelagem de um sistema de injeção direta de herbicida em taxa variável para aplicação em culturas agrícolas

Heitor V. Mercaldi<sup>1\*</sup>, Kleber R. Felizardo<sup>1\*</sup>,  
Vilma Alves Oliveira<sup>2\*</sup>, Paulo E. Cruvinel<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Pós-graduando, Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil

<sup>2</sup> Professora Doutora, Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil

<sup>3</sup> Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil

\*e-mail: heitor@usp.br; klerfe@sc.usp.br; vilma@sc.usp.br; cruvinel@cnpdia.embrapa.br

**Resumo:** A aplicação de herbicidas em taxa variável é uma importante ferramenta da agricultura de precisão. Em pulverizadores equipados com módulos de injeção direta, a eficácia da aplicação depende da quantidade correta de herbicida fornecida por estes tipos de módulos. O desenvolvimento de um modelo realístico para módulos desta natureza permitiu quantificar o efeito da pressão da linha de injeção na vazão do herbicida e resultados mostram a validação do modelo desenvolvido para sistema de injeção direta de herbicidas em taxa variável.

**Palavras-chave:** herbicidas, injeção direta, modelagem matemática, plantas invasoras, taxa variada.

## *Modeling a system of direct injection for variable rate herbicide application in agricultural crops*

**Abstract:** The application of herbicides in variable rate is an important tool for precision agriculture. In sprayers equipped with direct injection modules, the effectiveness of enforcement depends on the correct amount of herbicide provided by these types of modules. The development of a realistic model for such operation allows the quantification of the effect of the line pressure, as well as the flow of herbicide injection. Results show the validation of the model developed for direct injection, which can operate considering a variable application rate.

**Keywords:** direct injection, herbicides, mathematical modeling, variable rate, weed.



## 1. Introdução

Estudos mostram que a densidade e os tipos de plantas invasoras em diferentes regiões de uma mesma cultura podem não ser homogêneos. Devido a esta variabilidade espacial, a aplicação de herbicida pode ser feita de maneira localizada e em taxas variáveis. Para a aplicação em taxas variáveis podem ser utilizados pulverizadores equipados com módulos de injeção direta (CHRISTOFOLETTI, 2004; FIGUEIREDO, 2003). Nesses tipos de pulverizadores, o herbicida e o diluente (água) são mantidos em recipientes separados. De acordo com a localização das plantas invasoras, através de mapas de recomendação ou por sensores de plantas, o herbicida é injetado e misturado ao diluente numa determinada concentração dada de acordo com o tipo da planta infestante (TIAN, 2002; KOCHER, 1998). Esse tipo de sistema traz economia de herbicida, reduz tanto o impacto ambiental como a exposição do operador ao produto químico e permite misturar vários tipos de herbicidas de maneira automatizada (SHIRATSUCHI et al., 2003; STEWARD, 2000). No entanto, esses sistemas trazem os seguintes problemas: i) tempo de retardo, que é o tempo que o sistema leva para entregar a mistura em uma determinada concentração aos bicos de pulverização e ii) não- uniformidade da mistura (CROWE, 2005). Neste trabalho, o modelo completo do módulo de injeção é apresentado. Esse modelo permite simular variações de pressão ocorridas na linha onde é feita a injeção do herbicida. O modelo deste módulo é

importante para a etapa de desenvolvimento do módulo de controle da injeção, o qual é responsável por manter a taxa de aplicação do herbicida conforme uma referência pré-determinada.

## 2. Material e métodos

O módulo de injeção estudado neste trabalho está situado na linha de pressão da bomba principal, conforme ilustra a Figura 1. O módulo é formado por um motor de corrente contínua (motor CC) acoplado a uma bomba de pistão. O modelo deste módulo é composto de duas partes: modelo do motor CC e modelo do sistema hidráulico.

O modelo do motor CC é representado pelo diagrama de blocos da Figura 2. Nesse modelo, a inércia combinada das partes girantes, envolvendo carga, rotor, eixo e acoplamentos, é dada por  $J$  [Nms<sup>2</sup>/rad]. O atrito viscoso entre motor e carga é designado por  $B$

[Nms/rad]. Os parâmetros  $L_a$  [H] e  $R_a$  [ $\Omega$ ] são respectivamente, a indutância e a resistência da armadura do motor. As constantes de torque e velocidade do motor são dadas respectivamente pelos parâmetros  $K_t$  [Nm/A] e  $K_e$  [Vs/rad]. O torque de carga, em oposição ao torque elétrico desenvolvido pelo motor, devido à bomba estar conectada diretamente no eixo do motor, é denominado de  $T_p$  [Nm]. A função  $G5$  converte a velocidade de rotação do motor, dado por  $\omega$ , de [rad/s] para [rpm] e o bloco S1 é um saturador que limita a variação desta velocidade. As variáveis de entrada desse modelo são  $V_a$  [V] e  $T_p$  [Nm] e

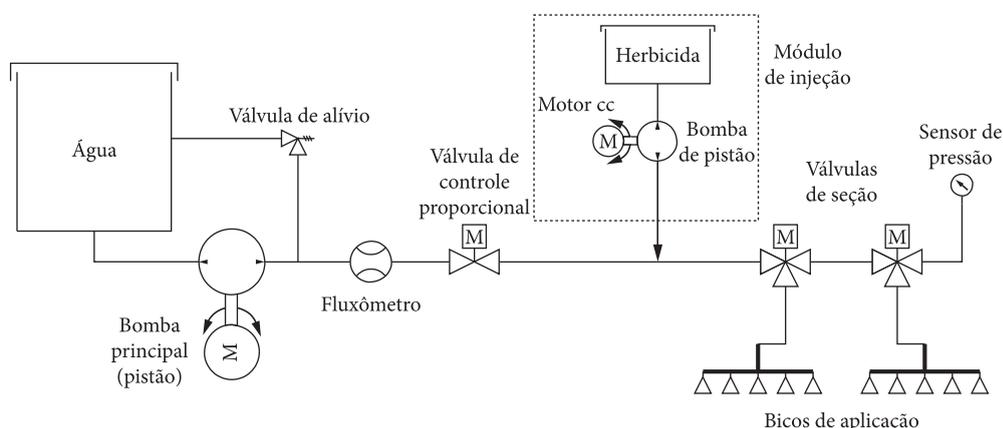


Figura 1. Diagrama esquemático do módulo de injeção direta para aplicação em taxa variada.

as variáveis de saída são  $I_a$  [A] e  $\omega$  [rpm], sendo  $V_a$  a tensão aplicada no motor e  $I_a$  a corrente de armadura do motor.

O modelo do sistema hidráulico é representado pelo diagrama de blocos da Figura 3. Esse modelo é composto por uma bomba de pistão e por uma tubulação. A bomba de pistão é composta pelos blocos G6 e G8. A vazão da bomba de pistão, dado por  $Q_h$  [L/min] é proporcional a  $\omega$  e seu torque  $T_p$  [Nm] é proporcional à pressão  $P$  [bar] na saída da tubulação. O parâmetro  $Volh$  [L/rev] da bomba de pistão é o deslocamento volumétrico por revolução. A tubulação utiliza mangueira de borracha e sua expansão e contração, devido a variações de  $P$ , provoca uma variação no volume da mangueira e um acréscimo na vazão da bomba  $Q_h$ , representado pela variável  $dQ$  [L/min] (HOLCKE, 2002). Essa dinâmica de expansão e compressão da mangueira é representada pelos blocos G9 a G13, sendo  $L$  [m] o comprimento da mangueira e  $d_0$  [m] seu diâmetro interno,  $K_p$  [m/Pa] é o coeficiente pressão-diâmetro  $\tau$  [s] é a constante de tempo visco-elástica e ambos dependem do material da mangueira. As variáveis de entrada

desse modelo são  $P$  e  $\omega$  e as variáveis de saída são  $T_p$ ,  $Q_h$  e  $Q'h$ , sendo  $Q'h$  a vazão real na saída da bomba de pistão considerando o efeito da expansão e contração da mangueira.

O modelo completo do módulo de injeção é a junção dos modelos do motor CC e do sistema hidráulico apresentados anteriormente. O modelo do módulo de injeção é apresentado na Figura 4.

### 3. Resultados e discussão

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais e de simulação considerando restrições na linha de pressão da bomba de pistão ( $P = 1$  Bar). Os resultados experimentais foram obtidos por uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*, modelo USB-6009. Esses resultados englobam as variáveis  $V_a$ ,  $I_a$ ,  $\omega$ ,  $P$ ; medidas respectivamente por conversor AD, sensor de efeito hall, encoder incremental e sensor de pressão piezoelétrico. Os parâmetros do modelo do módulo de injeção são encontrados na Tabela 1. O fluido utilizado nos ensaios foi à água. Os parâmetros do modelo do motor CC

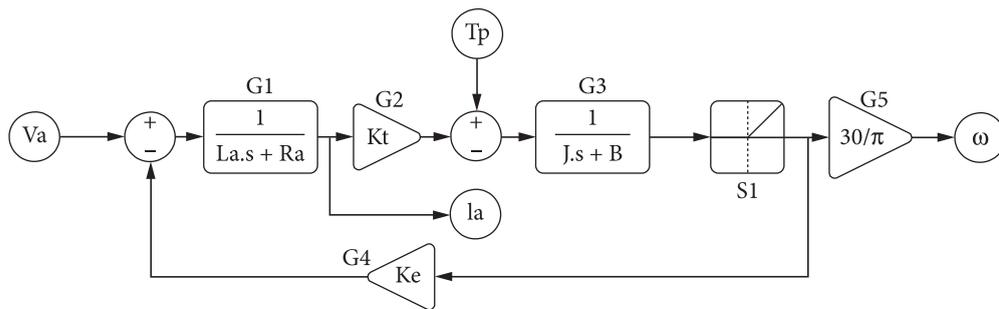


Figura 2. Diagrama de blocos do motor CC usando funções de transferência.

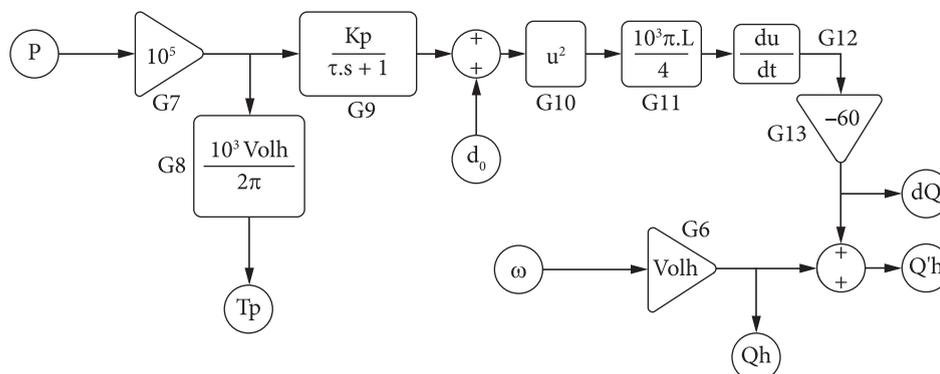


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema hidráulico usando funções de transferência.

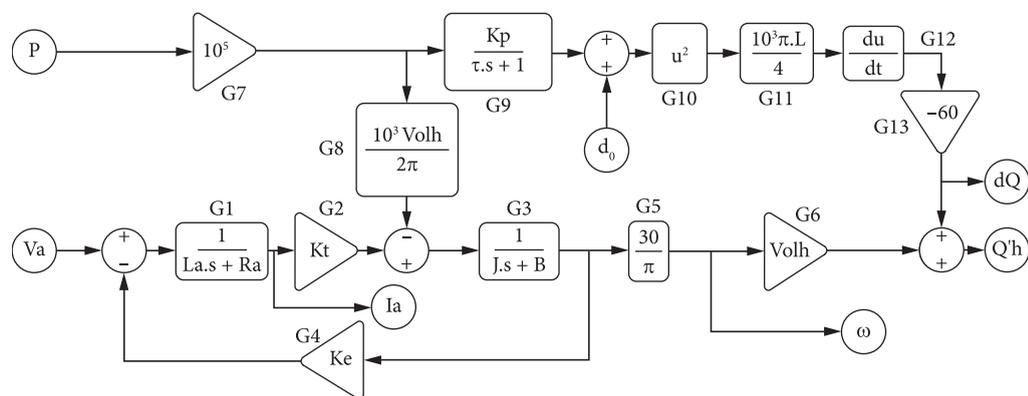


Figura 4. Diagrama de blocos do modelo do módulo de injeção.

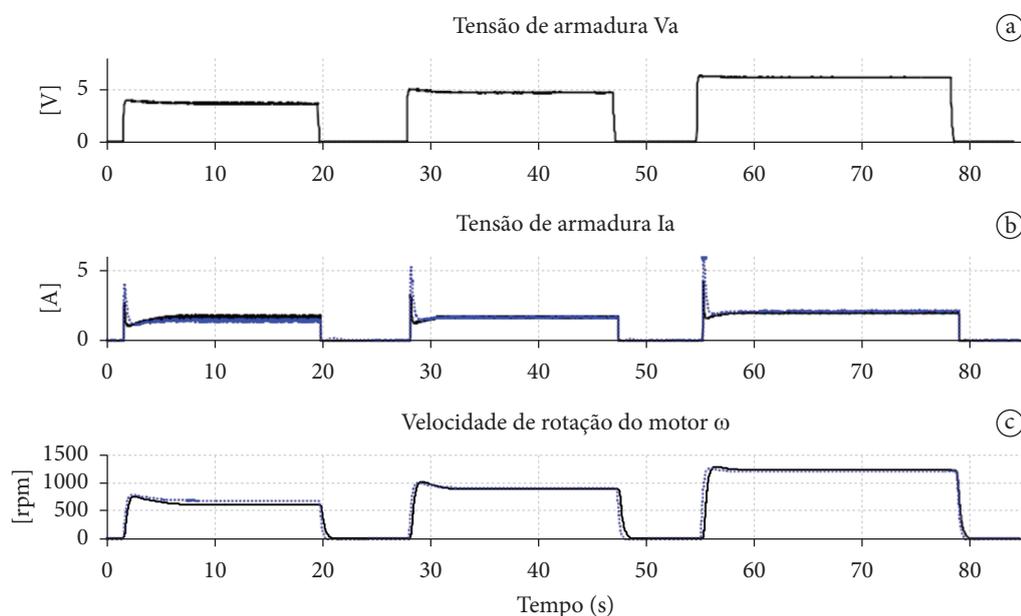


Figura 5. Resultados de simulação e dados experimentais do motor CC. a) Tensão  $V_a$  aplicada. b) Corrente  $I_a$  medida (linha preta) e simulada (linha azul). c) Rotação  $\omega$  medida (linha preta) e simulada (linha azul).

Tabela 1. Parâmetros de ajuste do modelo do módulo de injeção.

Parâmetro	Valor $1,0 \cdot 10^{-3}$	Unidade Henry
$R_a$	0,803	Ohms
$K_t$	0,0341	Nm/A
$K_e$	0,0341	Vs/rad
$J B$	$118,5 \cdot 10^{-6}$	Nms <sup>2</sup> /rad
	$296,4 \cdot 10^{-6}$	Nms/rad
$Volh$	0,00128	L/rev
$d_0$	0,0127	m
$L$	0,5	m
$K_p$	$2,24 \cdot 10^{-8}$	m/Pa
$\tau$	0,3	s

$R_a$ ,  $L_a$ ,  $K_t$ ,  $K_e$ ,  $B$  e  $J$  foram obtidos através de ensaios seguindo a metodologia fornecida por (OLIVEIRA, 2005). Os parâmetros da bomba de pistão (FMI-QB3) foram obtidos diretamente do manual do fabricante e os parâmetros da mangueira flexível foram ajustados na simulação de acordo com os dados experimentais.

As respostas do modelo do motor CC são apresentadas na Figura 5. Como pode ser observado, o modelo do motor CC reproduziu corretamente os dados experimentais. O efeito da expansão e da contração da mangueira, causado pela variação da pressão na linha de injeção, ocasionam respectivamente um decréscimo e um

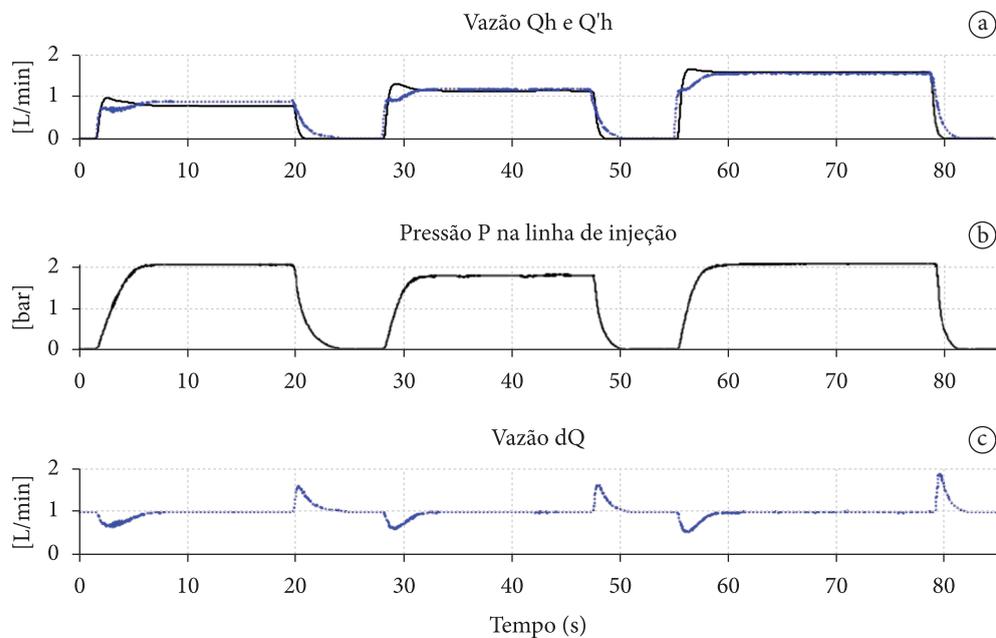


Figura 6. Resultados de simulação e dados experimentais da parte hidráulica. a) Vazão  $Q_h$  (linha preta) e vazão real  $Q'h$  considerando os efeitos de expansão e compressão da mangueira (linha azul). b) Pressão  $P$  medida na linha de injeção. c) Variação da vazão  $dQ$  devido aos efeitos da pressão na mangueira.

acréscimo na vazão (Figura 6a) durante o regime transitório de  $P$  (Figura 6b). Neste estudo os erros na vazão atingiram 0,9 L/min (Figura 6c), o que representam erros na concentração da dose e na taxa aplicação.

#### 4. Conclusões

Com este trabalho foi possível avaliar de maneira quantitativa a variação da vazão devido ao efeito da pressão na mangueira utilizada em um módulo de injeção. O modelo apresentado descreveu apropriadamente o comportamento dinâmico da vazão em função da variação de pressão na linha de injeção. Desta forma o modelo desenvolvido encontra potencial aplicação para taxa variável, tanto para uso em culturas anuais como para culturas perenes.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a Embrapa e a EESC-USP pelo apoio á parceria no âmbito da Rede em Agricultura de Precisão (Macro Programa 1, Processo: 01.09.01.002.01) e de projeto apoiado pelo CNPq (Processos: 306988/2007-0, 479306/2008-7, 479306/2008-8 e 143452/2008-8).

#### Referências

- CHRISTOFOLETTI, J. C. Direto no alvo. *Revista Cultivar Máquinas*, n. 34, p. 7-10, 2004.
- CROWE, T. G.; DOWNEY, D.; GILES, D. K.; SLAUGHTER, D. C. An electronic sensor to characterize transient response of nozzle injection for pesticide spraying. *Transactions of ASAE*, v. 48, n. 1, p. 73-82, 2005.
- FIGUEIREDO, Z. N. *Desenvolvimento e avaliação de um sistema de injeção para aplicação localizada de defensivos*. 2003. Tese (Doutorado)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.
- HOLCKE, J. *Frequency response of hydraulic hoses*. 2002. Dissertação (Mestrado)-Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.
- KOCHER, M. F.; LANY, Y.; CHENZ, C.; SMITH, J. A. Opto electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. *Transactions of the ASAE*, v. 41, n. 1, p. 237-245, 1998.
- OLIVEIRA, V. A.; AGUIAR, M. L.; VARGAS, J. B. *Sistemas de Controle: Aulas de Laboratório*. São Carlos: EdUSP, 2005.
- SHIRATSUCHI, L. S.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; FONTES, J. R. A. *Aplicação Localizada de Herbicidas*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. (Documentos, n. 91).
- STEWART, B. L.; HUMBURG, D. S. Modeling the raven SCS-700 chemical injection system with carrier control with sprayer simulation. *Transactions of the ASAE*, v. 43, n. 2, p. 231-245, 2000.
- TIAN, L. Development of a sensor-based precision herbicide application system. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 36, n. 2-3, p. 133-149, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00097-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00097-2)