

Modelagem Dinâmica Híbrida Aplicada a Pulverizadores Agrícolas em Barras com Tecnologia de Aplicação Liga/Desliga

Gabrielle A. Duarte* Paulo L. J. Drews-Jr**
Eder M. N. Gonçalves***

* Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal do Rio Grande, RS, (e-mail: gabriellerar@gmail.com).

** Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal do Rio Grande, RS, (e-mail: paulodrews@furg.br)

*** Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal do Rio Grande, RS, (e-mail: edergoncalves@furg.br)

Abstract: The traditional application of pesticides has been environmentalists and farmers concern. Therefore, the use of technologies can help in reducing the amount of product applied, which results in product savings and aggregate environmental impacts reduction. In order to study and better understand the problem, an experimental apparatus was developed with low-cost equipment for surveying parameters and behavior of spraying systems. In this context, this work addresses the dynamic modeling of a complete automated spraying system and the dynamic analysis involved.

Resumo: A aplicação tradicional de agrotóxicos tem sido motivo de preocupação tanto para ambientalistas, quanto por parte dos agricultores. Portanto, o uso de tecnologias pode ajudar na redução da quantidade de produto aplicado, resultando tanto em economia de produto quanto em redução dos impactos ambientais agregados. Visando estudar e entender melhor o problema, foi desenvolvido um aparato experimental com equipamentos de baixo custo para levantamento de parâmetros e comportamento dos sistemas de pulverização. Nesse contexto, esse trabalho aborda a modelagem dinâmica de um sistema completo de pulverização automatizado e a análise dinâmica envolvida.

Keywords: Precision Agriculture; Delay Time; Automation; Hybrid Dynamic Systems.

Palavras-chaves: Agricultura de Precisão; Atraso Temporal; Automação; Sistemas Dinâmicos Híbridos.

1. INTRODUÇÃO

A introdução de novas tecnologias para a produção de *commodities* agrícolas a partir da década de 50 acarretou em um aumento expressivo da carga de agrotóxicos utilizada no controle de pragas no campo. Devido a essas mudanças que a agricultura tem sofrido, de acordo com o Instituto Nacional do Câncer (INCA), os brasileiros tem consumido, em média, cinco litros de agrotóxico por ano (Milhorange, 2015).

Outro fator a ser considerado é que o problema também pode causar poluição ambiental e desequilíbrio do agrossistema (Grutzmacher et al., 2008; Zhang et al., 2018). Prova disso é que, em alguns casos, 99,9% do produto aplicado tende a se mover para locais como águas superficiais e subterrâneas (Ribeiro et al., 2007), pois de 30 a 50% da área total das plantações, não é coberta por plantas (Chang et al., 2012).

Entretanto, a Agricultura de Precisão (AP), definida por Campos Bernardi et al. (2014) como um “sistema de gestão que leva em conta a variabilidade espacial do campo com o objetivo de obter um resultado sustentável social,

econômico e ambiental”, parte de um viés puramente teórico, isto é, temática abordada apenas em livros, para a efetiva aplicação no campo em meados da década de 90 com o barateamento dos dispositivos GPS (Saraiva et al., 2000).

Neste contexto, surgem os pulverizadores em barras com aplicação bico a bico Liga/Desliga, isto é, que agregam tecnologias capazes de aplicar os produtos agrotóxicos onde de fato se faz necessária sua inserção. A partir disso, surgem no mercado soluções com esta abordagem, como é o caso do *Omni 700* da empresa JACTO. Porém, como é de se esperar, as tecnologias de compensação entre o tempo de detecção e atuação dos dispositivos dos pulverizadores das empresas fabricantes desse tipo de equipamento é de domínio privado e, portanto, são desconhecidos as variáveis e os parâmetros que possibilitam uma aplicação precisa dos agrotóxicos.

Além disso, nas tecnologias abordadas não são utilizadas câmeras, isto é, apenas dispositivos GPS (Sistema de Posicionamento Global) e IMU (Unidade de Medida Inercial) em alguns casos, que não garantem a correta aplicação. A

Figura 1 ilustra um exemplo de atraso referente a diferença entre a posição dos sensores e atuadores no pulverizador.

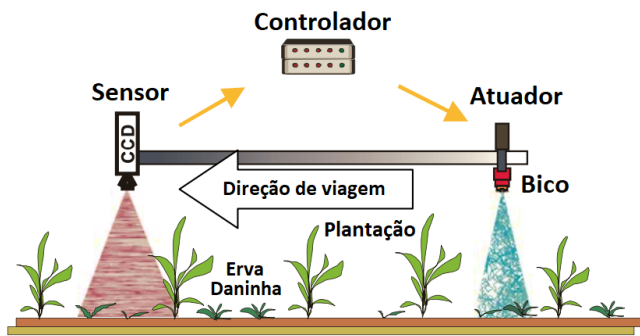


Figura 1. Imagem com destaque para a diferença de posição entre sensores e atuadores (Vondricka et al., 2007).

Logo, considerando o problema abordado, através do Projeto AutoCERES, do Grupo de Automação e Robótica Inteligente (NAUTEC) do Centro de Ciências Computacionais (C3), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) foi realizada a construção de um protótipo para elaboração de ensaios com o propósito de observar o comportamento do sistema e agregar tecnologias para otimizar a aplicação dos agrotóxicos. O diferencial neste protótipo é a utilização de equipamentos de baixo custo.

Com base nisso, este trabalho tem como tema a modelagem dinâmica de um sistema completo de pulverização agrícola automatizado e análise temporal dos atrasos envolvidos, sejam eles decorrentes de aspectos físicos ou gerados a partir da inserção de componentes no sistema.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

A Agricultura de Precisão, em especial os pulverizadores agrícolas em barras, vem sendo discutida por diferentes grupos de pesquisa principalmente a partir da década de 90. No entanto, não foram encontradas pesquisas que abordam especificamente a modelagem dinâmica de sistemas automatizados de pulverização em barras. Sendo assim, este capítulo foi dividido em duas seções: trabalhos relacionados a análises dinâmicas de sistemas de pulverização em barras e trabalhos de autores que realizam modelagem de sistemas dinâmicos híbridos.

2.1 Análise Dinâmica de Sistemas de Pulverização em Barras

Em Hanks and Beck (1998) é abordada a necessidade de detecção do verde em plantações para aplicação específica de herbicida nos alvos encontrados. Com a utilização de sensores espectrais foi possível diferenciar plantas (cor verde) de demais objetos da natureza em trechos a serem avaliados. Como a tecnologia detecta apenas o verde das demais cores, não há diferenciação entre o verde das plantas e o verde das ervas daninhas. Logo, o autor sugere em seu trabalho a inserção de *hoods*, que são toldos que separam as linhas de plantação das copas (região entre as linhas de plantação).

O dispositivo inserido auxilia na homogeneização da luz incidente nas plantas, reduz a deriva e inibe o contato do herbicida com a cultura cultivada. Um importante fator a ser abordado é que o autor considera o atraso causado na abertura e fechamento dos dispositivos de atuação para liberação da calda. Além disso, a solução proposta permite que o trator se desloque a uma velocidade de até 7,4 km/h. No entanto, destaca-se que a velocidade adotada deve ser prevista e constante, pois a distância entre os dispositivos sensores e atuadores depende diretamente da velocidade do trator.

Embora Hanks and Beck (1998) realizem a adaptação de um pulverizador convencional para aplicação da tecnologia, a inserção dos dispositivos *hoods* torna-se pouco viável devido a alta manutenção e baixa flexibilidade para uso em outras culturas. Destaca-se, ainda, que a solução apresentada é capaz apenas de detectar as ervas daninhas presentes nas copas das plantações e a necessidade em manter a velocidade do trator constante é fator limitante no processo.

Por outro lado, Tian et al. (2000) introduzem o uso de câmeras como sensores para a detecção de ervas daninhas. A tecnologia desenvolvida permite que sejam detectados diferentes tipos de verde e, portanto, dispensa o uso de dispositivos auxiliares, conforme o trabalho de Hanks and Beck (1998) sugeria. Utilizando-se de válvulas solenoides como dispositivos de atuação, o trabalho desenvolvido pelos autores permite uma velocidade máxima do trator de 4,2 km/h, pois a distância entre as câmeras e os bicos de pulverização é de aproximadamente 1,0 m e é levado em consideração o tempo de processamento da imagem das câmeras.

É possível observar, então, que o uso de câmeras torna-se uma solução viável se comparada à proposta apresentada por Hanks and Beck (1998). Todavia, não é citado e nem abordado no trabalho de Tian et al. (2000) o atraso mecânico e de dispersão do líquido por parte dos bicos de pulverização. Tais dinâmicas podem impactar no tempo de atuação dos bicos de pulverização, porém nenhum tipo de avaliação é realizada.

Com uma abordagem um pouco diferente, Carrara et al. (2004) propõem o controle de ervas daninhas a partir de um mapeamento *offline* da cultura, isto é, é realizada uma identificação prévia dos locais onde será necessária a aplicação dos herbicidas e, então, a partir de dados de GPS é calculada uma trajetória para o trator realizar de modo a aplicar nos locais pontuados no mapa prévio.

É importante destacar que o controle exposto por Carrara et al. (2004) é realizado por seções e, portanto, ainda que reduza o consumo de herbicida, não é a melhor solução para o problema, conforme abordado anteriormente. Observa-se, ainda, que nesse tipo de abordagem não há limitação da velocidade do trator, porém o mapeamento *offline* da cultura dificulta o uso da tecnologia. Por fim, novamente o autor despreza a questão dos atrasos inerentes ao acionamento e desacionamento das seções da barra de pulverização.

Já em Vondricka et al. (2007) é utilizado um pulverizador convencional em que são realizadas algumas adaptações. Preocupado também com ervas daninhas, o trabalho pro-

põe o controle bico a bico da barra de pulverização. O diferencial deste autor é que o mesmo realiza uma análise do tempo de resposta do fluido dado um sinal (pulso) de abertura dos bicos de pulverização.

Contudo, não é realizada uma análise da dinâmica do trator e do fluido para que sejam calibrados os tempos de acionamento de cada bico de pulverização envolvido (Vondricka et al., 2007). Ainda, uma vez que trata-se de identificação em tempo real (*online*) o trabalho não considera o tempo de processamento do sensor, nem apresenta qual o tipo de sensor utilizado na solução proposta.

Diferente dos trabalhos anteriores, o trabalho de Chattha et al. (2014) aborda a aplicação de agrotóxicos nas próprias plantações. O autor faz o uso de câmeras para identificação de linhas de plantação em tempo real e, a partir disso, realiza uma análise do tempo de processamento para posicionamento dos dispositivos de atuação na barra de pulverização.

Como aspecto positivo no trabalho Chattha et al. (2014), pode-se elencar que os autores além de considerar o tempo de processamento das imagens obtidas pelas câmeras, também leva em consideração o atraso no jato de pulverização (atraso de transporte do líquido). Em contrapartida, o dispositivo apresentado conta com suportes para as câmeras que ficam a uma distância de 7,32 m da barra de pulverização, o que pode dificultar as manobras a serem realizadas pelo trator.

Soma-se a isso a limitação da velocidade máxima de 4,8 km/h a ser desenvolvida pelo trator e também o fato do trator não ser do tipo convencional, ou seja, é utilizado um trator específico para a solução proposta, o que representa pouca flexibilidade para inserção da tecnologia em outros dispositivos e também alto custo para aquisição por parte dos agricultores familiares (Chattha et al., 2014).

Em Esau et al. (2018) é abordada também a questão da aplicação de agrotóxicos e não de herbicidas. O trabalho é desenvolvido em um trator convencional e câmeras são integradas como dispositivo sensor. Neste trabalho são considerados tanto o tempo de processamento por parte das câmeras quanto o atraso mecânico da atuação das válvulas solenoides.

Os testes da solução proposta são desenvolvidos em campos de mirtilo selvagem e o sistema é capaz de identificar até mesmo os estágios da planta, isto é, a intensidade de desfolhamento da cultura. Por outro lado, não é considerado o atraso de transporte do jato de pulverização e a velocidade máxima que pode ser desenvolvida pelo trator neste sistema é de 6,3 km/h.

Por fim, mais recentemente Ozluoyumak et al. (2019) propôs uma solução pouco convencional. Em seu trabalho é desenvolvido um protótipo em que são acoplados câmera e bico de pulverização com atuação pneumática. O ambiente em que são realizados os ensaios é totalmente controlado. Como o protótipo é fixo, a câmera consegue localizar com precisão as coordenadas do ponto de aplicação de agrotóxico. Neste trabalho também não são abordados os atrasos de processamento, transporte do fluido ou mecânico do

atuador e, devido às suas características construtivas, a tecnologia é pouco prática devido a sua baixa mobilidade.

Portanto, após o destaque de alguns trabalhos que se relacionam com as análises dinâmicas propostas no âmbito dos pulverizadores agrícolas em barras, percebeu-se que nenhum deles aborda em completo o que é desejado neste trabalho, ou seja, um sistema de pulverização convencional com detecção online, que realize o controle de bicos, em que o alvo seja a cultura, que utilize câmeras e que leve em conta os atrasos temporais de processamento das câmeras, fluidicos e mecânicos.

2.2 Modelagem de Sistemas Dinâmicos Híbridos

Esta seção aborda alguns trabalhos desenvolvidos na área de modelagem de sistemas dinâmicos híbridos. Logo, o intuito de Liu et al. (1999) é apresentar a modelagem de um sistema híbrido baseado em hierarquia utilizando a ferramenta *Ptolemy II*, estrutura de *software* de código aberto que suporta simulações de redes de processos, eventos discretos, fluxo de dados, modelos de tempo contínuo, entre outros. Logo, os autores utilizam modelos de tempo contínuo combinados com autômatos de estados finitos para simular um sistema de controle de helicóptero híbrido.

Embora o *software* permita a inserção do modelo, não é possível realizar simulações, sendo necessária a utilização de uma Applet Java, *software* destinado à execução de uma atividade específica para obtenção dos resultados do modelo.

Por outro lado, Castaneda et al. (2013) utilizam a ferramenta *Simulink* do *software* Matlab, que permite tanto a modelagem quanto a simulação dos modelos elaborados. Utilizando-se dessa possibilidade os autores realizam a modelagem da gestão de um sistema híbrido autônomo baseado em painéis solares fotovoltaicos. Sendo assim, conseguem avaliar informações como a potência gerada em função da tensão nos painéis e a curva de descarga das baterias, comparando as diferentes estratégias de controle implementadas.

Portanto, ao finalizar o estudo de trabalhos relacionados ao tema proposto, pode-se concluir que, embora as tecnologias apresentadas possuam como objetivo a aplicação bico a bico de produtos agrotóxicos, nenhum dos autores destacados aborda os atrasos relacionados à incerteza nas medidas de localização e velocidade do trator tão importantes na agricultura de precisão.

Ademais, não são apresentados todos os atrasos inerentes ao sistema, mesmo na situação em que possam ser desconsiderados. Por fim, destaca-se a ausência de trabalhos que tratem a questão dos modelos dinâmicos específicos de sistemas de pulverização agrícola.

3. METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia proposta para solucionar o problema que vem sendo discutido ao longo deste trabalho.

3.1 Protótipo

O protótipo desenvolvido foi adaptado a partir de um pulverizador agrícola em barras modelo Rubemag P320X com

20 bicos de pulverização com anti-gotejamento, alimentados por mangueira agrícola de 1/2", filtro de partículas e uma válvula de alívio ajustável montada em um bloco com manômetro e três válvulas de controle manuais, sendo uma para o agitador superior do reservatório, uma para o lado esquerdo da barra e a última para o lado direito da barra (Terra et al., 2019, 2020).

O controle principal do protótipo é realizado por Arduino MEGA (ATmega2560). O controlador é responsável por ler os sinais de pressão e vazão. Os dados de vazão são requisitados via comunicação I2C para um segundo controlador escravo do modelo Arduino UNO (ATmega328P). Além disso, o controlador principal recebe os dados de abertura de fechamento das válvulas solenoides que é transmitido por Bluetooth por um smartphone. Como o controlador não possui corrente suficiente para alimentação de todo o sistema, foi desenvolvida uma placa de acionamento por relés para as válvulas solenoides.

Para a identificação das linhas de plantação são utilizadas câmeras para aquisição de imagens. A partir das imagens capturadas são identificadas as linhas de plantação por meio de algoritmos de visão computacional (Weber et al., 2018). Após capturadas as imagens, ocorre a etapa de pré-processamento, responsável por determinar o percentual de pixels verdes presentes na imagem. As demais etapas de segmentação, clusterização, identificação de linhas de plantação e demais tecnologias envolvidas são realizadas na etapa de processamento. O estudo dos algoritmos que atendem melhor aos requisitos impostos pelo sistema ainda encontra-se em desenvolvimento. Dada a definição da câmera que será utilizada, serão construídos suportes para realizar a sustentação dos dispositivos de captura de imagens.

Encontra-se em fase de desenvolvimento, a inserção de unidades de medida inercial (IMU), formadas por acelerômetros e giroscópios e responsáveis por oferecer ao sistema informações de posição e orientação, e GPS para coleta de informações de posicionamento global (Nyland, 2017). Com estes dados é possível monitorar o deslocamento do trator e também mapear as áreas de aplicação dos agrotóxicos. É importante ressaltar que o protótipo pode sofrer alterações e alguns dispositivos podem ser retirados ou inseridos no sistema, de forma a garantir a melhor funcionalidade para o pulverizador agrícola automatizado.

3.2 Modelo Dinâmico Híbrido do Sistema

Conforme abordado na seção anterior, o sistema de pulverização em barras convencional foi equipado com diversos componentes mecânicos e eletrônicos para que fosse possível tornar o modo de aplicação dos defensivos no formato Liga/Desliga e, devido à natureza destes elementos, o sistema pode ser caracterizado como um sistema dinâmico híbrido. Nesse contexto, é necessário avaliar como ocorre a dinâmica do processo, isto é, o impacto dinâmico acarretado a partir da inserção desses novos componentes no sistema.

Sendo assim, de modo geral, o sistema de pulverização automatizado pode ser dividido em quatro grandes áreas: sistema de visão e localização, sistema de aquisição de dados, sistema trator-pulverizador e sistema de atuação. Dito

isso, o sistema de visão trata da aquisição e processamento de imagens para identificação de plantas e linhas de plantação. O sistema de aquisição de dados coleta dados de GPS e IMU para verificar comportamento dinâmico do trator em que está inserido o pulverizador agrícola em barras e dados de pressão e vazão para avaliação da dinâmica fluidica da calda para pulverização. Por fim, o sistema de atuação é responsável pelo acionamento das válvulas que controlam a aplicação, permitindo ou obstruindo a passagem do fluido que atinge as plantas.

Logo, inicialmente, para melhor visualização do comportamento geral do sistema, a Figura 2 apresenta o fluxograma de funcionamento do sistema de pulverização automatizado.

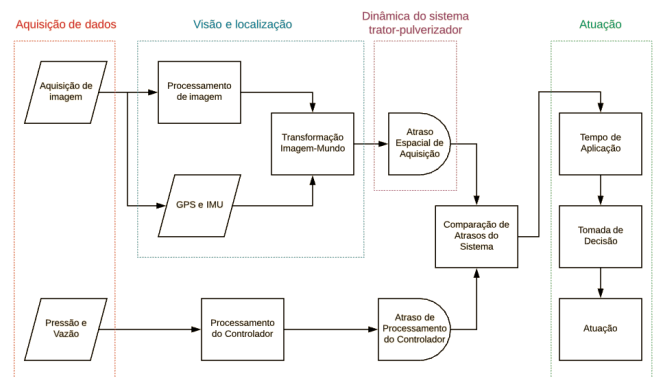


Figura 2. Fluxograma de funcionamento do sistema.

Dessa forma, inicialmente o sistema realiza a aquisição da imagem da plantação e, na Figura 3, é possível observar que o bloco de aquisição de imagem apresenta dois estados, sendo o primeiro a representação do início da coleta efetiva da imagem e o segundo a finalização desta aquisição.

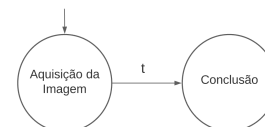


Figura 3. Bloco de aquisição de imagem.

Associados a esses estados, pode-se destacar a transição temporal t , que representa justamente o tempo necessário para que a câmera possa coletar de fato a imagem de interesse para fornecer ao algoritmo que realizará seu processamento. Um importante fator a ser destacado é a presença da seta superior no bloco de aquisição de imagem, que representa o estado inicial da referida máquina de estados e será utilizada em todos os blocos iniciais na modelagem do sistema.

Dessa forma, todos os blocos foram modelados de acordo com os seus respectivos comportamentos. A seguir, será mostrada a implementação do sistema em software.

3.3 Modelo Descrito em Simulador

Para a realização de simulações, foi utilizada a toolbox StateFlow do Simulink, ferramenta integrada ao software Matlab. A Figura 4 apresenta o modelo do sistema na ferramenta de simulação.

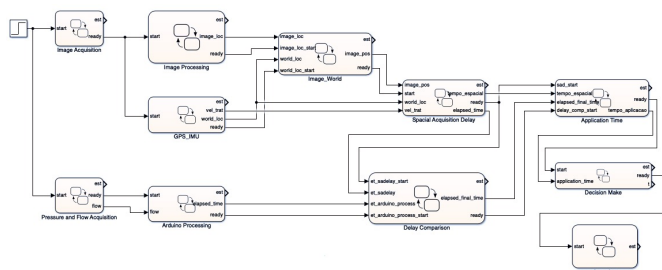


Figura 4. Modelo do sistema de pulverização em ferramenta de simulação.

Analogamente a lógica de apresentação dos blocos ilustrada na etapa de modelagem, será apresentado a seguir uma das máquinas de estado que compõem o sistema completo. Sendo assim, a Figura 5 apresenta o bloco de aquisição de imagem, que contém os estados *Waiting*, *Image acquisition* e *Conclusion*.

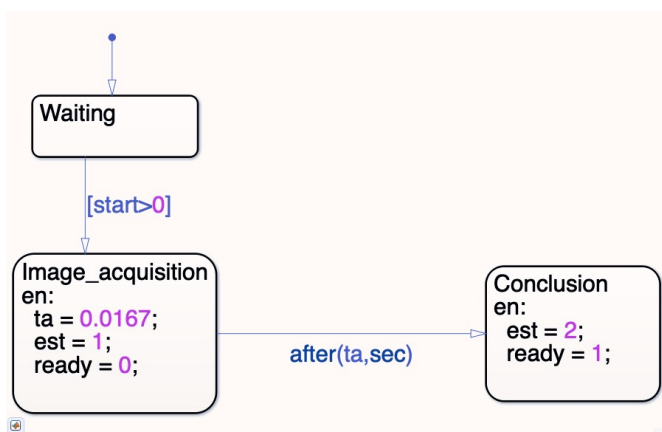


Figura 5. Máquina de estados de aquisição de imagem.

A partir da Figura 5 verifica-se que a mudança de estados ocorre na execução da função *after*. Tal função permite que transição seja temporal, ou seja, ocorra após determinado intervalo de tempo. Portanto, como parâmetros recebe primeiramente um valor de tempo que deve estar presente no conjunto dos números reais e, por fim, a escala da unidade de tempo desejada (*usec*, *msec*, *sec*).

É importante destacar que para todas as máquinas de estados utiliza-se o estado inicial *Waiting* para sincronização do sistema. Isso ocorre, pois no simulador utilizado, uma vez iniciada a simulação, todos os estados iniciais de todos os blocos são chamados, iniciando, então, todas as máquinas de estado, o que não é desejado e, em virtude disso, faz-se necessária tal sincronização.

Ainda, os atrasos temporais como, por exemplo, a variável *ta* na Figura 5 são parâmetros importantes nas simulações do modelo do sistema completo e foram obtidas através de experimentos e/ou representações matemáticas que não serão discutidos neste trabalho.

4. RESULTADOS

Após o desenvolvimento da modelagem do sistema apresentado na metodologia em plataforma compatível com simulação de sistemas dinâmicos híbridos, é possível realizar

simulações para verificar o comportamento das máquinas de estados que compõem o modelo do pulverizador. Dessa forma, nessa seção serão apresentados alguns dos resultados obtidos.

Para inicialização do sistema foi utilizado o bloco degrau (*step*) do *software* Matlab. Nesse momento, as máquinas de estado *Image Acquisition* e *Pressure and Flow Acquisition* são ativadas. A Figura 6 mostra a evolução dos estados para os blocos.

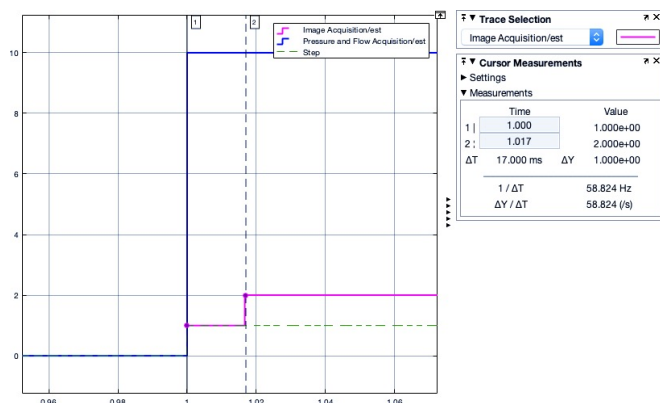


Figura 6. Gráfico de visualização da evolução dos estados das máquinas *Image Acquisition* e *Pressure and Flow Acquisition*.

É possível observar da Figura 6 que no momento de ocorrência do degrau (eixo $x = 1$), mostrado pela curva verde pontilhada, o estado 1 (identificador do estado *Image_acquisition*) é alcançado e, após aproximadamente 0,017 s, a máquina passa para o estado 2 (identificador do estado *Conclusion*), conforme mostra a curva magenta contínua. Além disso, no mesmo instante em que o estado 1 é alcançado, também há mudança da curva azul contínua para o valor 10 (estado *Pressure and Flow Acquisition*).

Sendo assim, verifica-se que o funcionamento dos blocos apresentam o comportamento esperado. Destaca-se que, a partir da janela *Cursor Measurements*, é possível visualizar com maior precisão os instantes de tempo da simulação, pois a partir da correta configuração dos cursores 1 e 2, é definido o intervalo que se deseja medir.

Foram realizadas as verificações de funcionamento de todos os blocos que compõem o fluxo do sistema completo e os resultados apresentados foram os esperados, ou seja, é possível afirmar que a modelagem utilizada é completamente suportada pelo *software* adotado.

Por fim, para concluir as análises envolvendo as simulações realizadas, na Figura 7 é possível observar o atraso total do modelo de aproximadamente 1,767 s, isto é, o intervalo de tempo entre a entrada degrau (*step*) e a conclusão de aplicação dos produtos defensivos).

É importante destacar que os atrasos e modelos matemáticos utilizados no blocos representam o protótipo conforme atualmente composto e, na eventualidade de substituição de componentes que apresentam comportamentos e tempos de processamento diferentes, é necessário atualizar o modelo completo com os novos parâmetros.

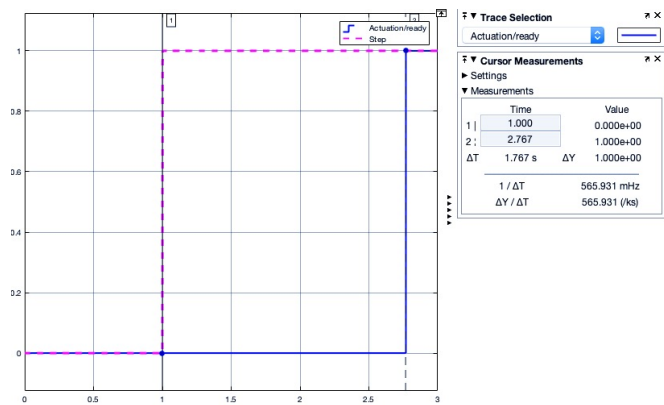


Figura 7. Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Actuation*.

5. CONCLUSÕES

A partir das simulações realizadas neste trabalho foi possível observar a importância do conhecimento dos parâmetros que compõem o sistema de pulverização automatizado de modo que o modelo tente representar da forma mais fidedigna possível o sistema de pulverização real. Além disso, foi possível observar pontos do protótipo onde encontram-se os gargalos que comprometem a tomada de decisão após a aquisição de imagens.

Por fim, embora os resultados das simulações sejam importantes para avaliação atual do protótipo, a maior contribuição do modelo diz respeito à possibilidade de simulações que poderão ser realizadas visando a substituição de componentes para otimização do sistema de pulverização automatizado.

REFERÊNCIAS

- Campos Bernardi, A.C.d., Naime, J.d.M., Resende, V.d., Bassoi, L.H., and Inamasu, R.Y. (2014). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, 1 edition.
- Carrara, M., Comparetti, A., Febo, P., and Orlando, S. (2004). Spatially variable rate herbicide application on durum wheat in sicily. *Biosystems Engineering*, 87, 387–392. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.01.004.
- Castaneda, M., Cano, A., Jurado, F., Sánchez, H., and Fernández, L.M. (2013). Sizing optimization, dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone pv/hydrogen/battery-based hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.080.
- Chang, Y.K., Zaman, Q.U., Schumann, A.W., Percival, D., Esau, T., and Ayalew, G. (2012). Development of color co-occurrence matrix based machine vision algorithms for wild blueberry fields. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- Chattha, H., Zaman, Q., Chang, Y., Read, S., Schumann, A., Brewster, G., and Farooque, A. (2014). Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 70–78. doi:10.1016/j.compag.2013.10.012.
- Esau, T., Zaman, Q., Groulx, D., Farooque, A., Schumann, A., and Chang, Y. (2018). Machine vision smart

- sprayer for spot-application of agrochemical in wild blueberry fields. *Precision Agriculture*, 19. doi:10.1007/s11119-017-9557-y.
- Grutmacher, D.D., Grutmacher, A.D., Agostinetti, D., Loeck, A.E., Roman, R., Peixoto, S.C., and Zanella, R. (2008). Monitoramento de agrotóxicos em dois mananciais hídricos no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(6), 632–637.
- Hanks, J.E. and Beck, J.L. (1998). Sensor-controlled hooded sprayer for row crops. *Cambridge University Press*, 12(2), 308–314. doi:10.1017/S0890037X00043864.
- Liu, J., Liu, X., Koo, T.K.J., Sinopoli, B., Sastry, S., and Lee, E.A. (1999). A hierarchical hybrid system model and its simulation. *38th IEEE Conference on Decision and Control*. doi:10.1109/cdc.1999.827883.
- Milhorance, F. (2015). Brasil lidera o ranking de consumo de agrotóxicos. *O Globo*.
- Nyland, N.M. (2017). Sistema embarcado de baixo custo com geolocalização para realização de mapeamento da resistência à penetração e umidade do solo. Bacharelado em Engenharia de Automação, Universidade Federal do Rio Grande (FURG).
- Ozluoyun, O., Bolat, A., Bayat, A., and Guzel, E. (2019). Turkish journal of agriculture and forestry design, development, and evaluation of a target oriented weed control system using machine vision. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 43, 164–173. doi:10.3906/tar-1803-8.
- Ribeiro, M.L., Lourencetti, C., Pereira, S.Y., and de Marchi, M.R.R. (2007). Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, 30(3), 688–694.
- Saraiva, A.M., Cugnasca, C.E., and Hirakawa, A.R. (2000). Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. *Agricultura de precisão*.
- Terra, F.P., da Rosa, G.R.A., Prado, J.J.P., and Drews-Jr, P.L.J. (2020). A low-cost prototype to automate agricultural sprayers. *International Federation of Automatic Control, 21st IFAC World Congress*.
- Terra, F., da Rosa, G., and Drews, P. (2019). Evaluation of the pressure-flow relationship in a boom of an autonomous robotic agricultural sprayer. In *2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, 228–233. doi:10.1109/LARS-SBR-WRE48964.2019.00047.
- Tian, L., Reid, J., and Hummel, J. (2000). Development of a precision sprayer for site-specific weed management. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 42. doi:10.13031/2013.13269.
- Vondricka, J., Hloben, P., and Schulze Lammers, P. (2007). Optimization of direct nozzle injection system for site-specific herbicide application. volume 1. doi:10.13031/2013.22906.
- Weber, F., Rosa, G., Terra, F., Oldoni, A., and Drews, P. (2018). A low cost system to optimize pesticide application based on mobile technologies and computer vision. In *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, 345–350.
- Zhang, Z., Wang, X., Lai, Q., and Zhang, Z. (2018). Review of variable-rate sprayer applications based on real-time sensor technologies. *Intech*.