

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO APLICADA AO CONTROLE DE SISTEMA DE SUBIRRIGAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS

NELSON FELIPE OLIVEROS MESA<sup>1</sup>, DANIEL DOS SANTOS COSTA<sup>2</sup>, ANGEL PONTIN GARCIA<sup>3</sup>, FABRICIO THEODORO SOARES<sup>4</sup>, BARBARA JANET TERUEL MEDEROS<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Mestrando, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas Fone: (019) 3521-1033, e-mail: nelson.mesa@feagri.unicamp.br

<sup>2</sup> Doutorando, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas Fone: (074) 2102-7621, e-mail: daniel.costa@univasf.edu.br

<sup>3</sup> Prof. Doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Fone: (019) 3521-2900, e-mail: angel.garcia@feagri.unicamp.br

<sup>4</sup> Doutorando, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Fone: (019) 3521-1746, e-mail: fabricio.soares@feagri.unicamp.br

<sup>5</sup> Profa. Doutora, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Fone: (019) 3521-1082, e-mail: barbara.teruel@feagri.unicamp.br

Apresentado no

XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017  
30 de julho a 03 de agosto de 2017 - Maceió - AL, Brasil

**RESUMO:** Para otimização do sistema de subirrigação, é necessário se obter o comportamento dinâmico de umedecimento do substrato, a fim de se projetar sistemas de controle capazes de manter a umidade em níveis ideais para o desenvolvimento da planta. Com isso, objetivou-se parametrizar um modelo dinâmico do umedecimento e propor, por meio de simulação, uma estratégia de controle de umidade do substrato. Os dados para a obtenção do modelo foram obtidos aplicando degraus na lâmina de água (entrada) e, como resposta, observou-se o umedecimento do substrato no tempo (saída). Obteve-se os parâmetros do modelo (MATLAB/ *System Identification Toolbox*), neste caso de primeira ordem. Com o modelo, construiu-se (SIMULINK) uma estratégia de controle em malha fechada baseada na umidade do substrato, e se comparou aos resultados obtidos com o controle convencional (baseado em um temporizador). O modelo se ajustou às curvas de resposta obtidas, com os parâmetros não constantes. O controlador proposto reduziu o erro médio de umidade, comparado ao convencional, de 7% para 4%. Os resultados obtidos demonstram a capacidade da estratégia de controle de melhorar a qualidade da subirrigação.

**PALAVRAS-CHAVE:** ambiente protegido, laço fechado, substratos

## MODELING AND SIMULATION APPLIED TO THE CONTROL OF SUBIRRIGATION SYSTEM FOR PRODUCTION OF CHANNELS

**ABSTRACT:** Aiming to optimize the sub irrigation system, it's necessary to obtain the substrate moistness dynamic behavior, to project control systems capable of maintain the moisture, in ideal levels for the plant development. Thereby, the objective of this work was to parametrize a moistness dynamic model and propose, by means of simulation, a substrate moisture control strategy. The model creation data was obtained applying different steps in the water blade (input) and, as response, the substrate moistness through the time was observed (output). The model parameters were obtained (MATLAB / *System Identification Toolbox*), being first order models for this case. With the model, a substrate moisture based closed-loop control strategy (SIMULINK) was implemented, and was compared with the

obtained results from the conventional controller (temporization based). The model has adjusted to the obtained response curves, with non-constant parameters. The proposed controller reduced the moisture mean error, compared to the conventional, from 7% to 4%. The obtained results demonstrate the control strategy capability to improve the sub irrigation quality.

**KEYWORDS:** protected environment, closed-loop, substrates

## INTRODUÇÃO

Na produção agrícola em ambiente protegido o controle das variáveis microclimáticas, o manejo de irrigação e os tratos culturais formam o conjunto das principais técnicas para o cultivo, sendo a irrigação provavelmente aquela que permite maior aumento de produtividade (EMBRAPA, 2011), e por isso é fundamental para a viabilização da produção. Diferente das soluções tecnológicas para ambiência onde uma mesma tecnologia é eficaz para a produção em diferentes sistemas de cultivo, as soluções para irrigação estão diretamente associadas ao sistema de cultivo, mais especificamente ao substrato utilizado.

No cultivo de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar por subirrigação são utilizados tubetes para a retenção de porções de substrato utilizadas como meio de cultivo. As mudas são irrigadas por meio da aplicação de uma lâmina d'água ou de solução nutritiva sobre a mesa, que entra em contato com o corpo dos tubetes e atinge o substrato por um orifício na base do recipiente. Durante o preenchimento da lâmina, a água eleva-se pelo substrato por efeito de vasos comunicantes e capilaridade. Após atingir determinada altura, a lâmina é drenada da mesa. O processo de irrigação ocorre em ciclos dimensionados para manter o conteúdo volumétrico de água (CVA) do substrato nos níveis ideais para o desenvolvimento segundo às necessidades da cultura e do processo.

De acordo com Lopes et al. (2007), a altura e o tempo de retenção da lâmina d'água são as principais variáveis para o dimensionamento do processo de irrigação. Posteriormente, Ferreira Filho et al. (2012) chegaram à conclusão de que o CVA é mais sensível à variação na altura da lâmina de água do que o tempo de retenção, afirmando também que pela diversidade de substratos e culturas utilizados na produção de mudas em tubetes, estudos visando estabelecimento do nível da água e do tempo de irrigação precisam ser conduzidos para viabilizar a aplicação da subirrigação nessas condições de produção.

Para o controle da irrigação existem em geral duas classes principais (ZAZUETA, SMAJSTRLA e CLARK, 1994). A primeira classe são os controladores em laço aberto, os quais são baseados em um conceito pré-definido de controle, sem nenhum feedback do objeto de controle, sendo o tempo o principal fator no processo; A segunda classe são os controladores de laço fechado, os quais são baseados na combinação predefinida do conceito de controle e o feedback do objeto controlado. Neste tipo de controle, existe um feedback dos dados necessários para determinar a quantidade de água necessária para a irrigação, de forma que conforme as condições mudem a lâmina de água de irrigação muda também (KIA, FAR, et al., 2009).

Neste trabalho, um modelo matemático não linear de primeira ordem da dinâmica do CVA do substrato em tubete é utilizado para a simulação matemática de um processo de subirrigação por ciclos de elevação e drenagem de lâmina d'água. O objetivo do presente trabalho foi parametrizar um modelo da dinâmica do umedecimento do substrato, em função da lâmina de água e projetar um sistema de controle, em malha fechada, por meio de simulações, de um sistema de subirrigação.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os parâmetros para o modelo do sistema de irrigação foram espelhados de um conjunto de mesas de subirrigação de uma casa de vegetação do campus. As mesas de subirrigação possuem área útil de 8,3 m<sup>2</sup> onde são apoiadas bandejas com os tubetes, um reservatório de solução nutritiva e motobomba para a irrigação, cada. Os parâmetros para o modelo da resposta dinâmica do CVA foram obtidos por meio de ensaios com a aplicação de diferentes alturas de lâmina d'água em quatro tubetes (quadruplicata) contendo substrato à base de casca de pinus, instrumentados com sensores de CVA modelo EC-5 da Decagon Device. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Instrumentação e Controle da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI UNICAMP). Os sensores foram previamente calibrados fazendo uso do método gravimétrico como referência padrão com o qual foi obtida a equação de calibração do sensor (equação 1) com um coeficiente de determinação de 0,962.

$$CVA = 0,0016 V - 0,608 \quad (1)$$

Sendo:

CVA, o conteúdo volumétrico de água (cm<sup>3</sup> /cm<sup>3</sup>);

V, a tensão de resposta do sensor (mV).

A resposta dinâmica do umedecimento do sistema, medido pelo CVA, foi determinada aplicando-se diferentes degraus, que correspondem a diferentes alturas de lâmina d'água nos valores: 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm e 50 mm. As curvas de resposta correspondentes a cada um desses níveis de lâmina d'água foram analisadas observando-se os ganhos e tempos de estabilização por meio da identificação de funções de transferência de primeira ordem para cada curva de resposta. Para a identificação do sistema foi utilizada a ferramenta *System Identification Toolbox*, do programa MATLAB. Com o modelo parametrizado foi dado início às simulações do sistema e o projeto do controlador para o ajuste do CVA ao longo dos ciclos de irrigação simulados. As simulações foram realizadas no ambiente SIMULINK do MATLAB.

Com o modelo, desenvolveu-se (SIMULINK) uma estratégia de controle em malha fechada baseada na medida de umidade (CVA) do substrato, para o algoritmo de controle se propõe o uso de uma janela, ao redor do *setpoint* de umidade desejado em malha fechada. Assim, é calculada a diferença entre a leitura de CVA dos sensores e o valor do *setpoint*, se a diferença estiver fora da janela de tolerância estabelecida, e representada por um *relay*, será produzido um cambio de estado do *relay*, enviando um sinal de saída correspondente a ligar ou desligar a bomba do sistema de subirrigação.

Para a avaliação da estratégia de controle proposta, foi implementada também uma um algoritmo de controle usando um temporizador (malha aberta), no qual se realiza uma irrigação por pulsos, seguindo os conceitos tradicionais de irrigação, sem uso de sensores de solo como *feedback* do sistema. O sistema temporizado, funciona baseado em tempos previamente predefinidos pelo usuário que são correspondentes às amplitudes dos pulsos de irrigação, definindo o tempo de duração da irrigação e a frequência da mesma.

As estratégias de controle foram implementadas e simuladas, para a partir das simulações, comparar a estratégia de controle proposta com o controle convencional para fins de verificação de exatidão e eficiência. Posterior às simulações, avaliou-se para ambas estratégias o erro médio da umidade em torno ao *setpoint* desejado de CVA do substrato.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica do sistema foi determinada aplicando-se diferentes degraus, que corresponde a diferentes níveis de lâmina de água na mesa de subirrigação (10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm) e verificada a resposta no tempo a essas entradas (Figura 1).

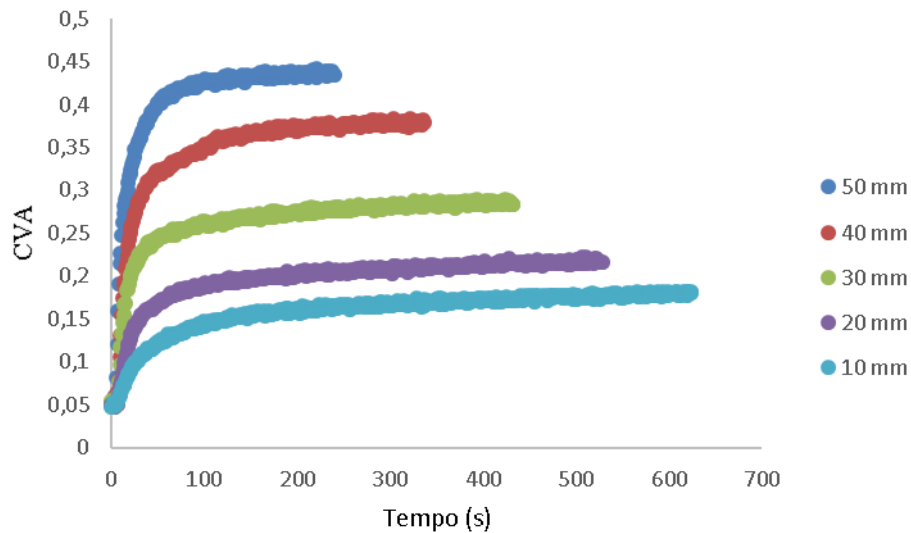


FIGURA 1. Resposta da capacidade volumétrica de água a diferentes níveis de lâmina aplicada.

Constatou-se que as diferentes respostas possuem tempo de estabilização e ganho estático diferentes. Assim, foram realizadas regressões do tempo de estabilização ( $t$ ) e ganho estático ( $k$ ) em relação aos níveis de lâmina, obtendo as seguintes equações para os parâmetros respectivamente:

$$\begin{aligned} t &= -0,08857n^2 + 0,09427n + 381,6 \\ k &= 0,05611e^{-0,1961n} + 0,01117e^{-0,006003n} \end{aligned} \quad (2)$$

(3)

Onde:

$t$ : tempo de estabilização (s);

$k$ : ganho estático;

$n$ : nível da lâmina (mm).

A partir dos parâmetros de tempo de estabilização e ganho estático, é possível resolver o comportamento dinâmico do sistema de primeira ordem:

$$g(s) = \frac{k}{t*s+1} \quad (4)$$

Onde:

$t$ : constante de tempo;

$k$ : ganho estático;

Tendo já parametrizado o modelo dinâmico de umedecimento foi possível realizar a proposta de controle em malha fechada para o sistema de subirrigação baseado na umidade do substrato. O algoritmo da simulação é composto por três subsistemas, sendo eles: lâmina, umidade e supervisor. O *setpoint* do CVA é o parâmetro de entrada predefinido principal para a simulação, isto devido a que a vazão da bomba, o volume útil da mesa e o volume dos tubetes são já definidos e a partir da modelagem descrita anteriormente. O sistema tem a capacidade de calcular a altura de lâmina de água na mesa, no subsistema de lâmina, e posteriormente, em função da lâmina de água são calculados os parâmetros de constante de tempo e ganho estático no bloco de umidade, assim como a capacitância ocupada pela água, tomando em conta a geometria cônica dos tubetes e a porosidade; obtendo finalmente o CVA correspondente a variação da lâmina de água no tempo. Posteriormente no subsistema supervisor é modelada a dinâmica de variação do CVA tomando em conta a capacidade de retenção de umidade do solo.

O CVA no tubete é controlada pelo erro entre o *setpoint* definido e o CVA calculado a partir da modelagem, assim, utiliza-se um *relay* como principal atuador, na simulação os valores do estado ligado ou desligado são de 1 quando ligado e -0.5 quando desligado, isto devido a que vazão de drenagem é a metade da vazão da bomba, representada pelo ganho, de três metros cúbicos por hora.

Foi implementado também um gerador de pulso baseado no tempo, com amplitude unitária e período de 2500 segundos e largura de pulso de 60% do período. O período esta modelando o tempo máximo que as raízes da planta podem ficar com o substrato totalmente saturado, implicando que os poros estão totalmente ocupados por água, prejudicando o desenvolvimento e a fisiologia da planta; conseqüentemente a largura do pulso é a porcentagem do período que o pulso vai ficar ativado e o tempo restante é a porcentagem de tempo que vai ser usado para arear o substrato visando não gerar danos à planta. Utiliza-se um chaveamento seguindo o pulso para simular que quando seja o momento de permitir a áreação do substrato se gere uma vazão de drenagem da mesa.

Seguindo o chaveamento correspondente ao pulso, foi implementado um segundo chaveamento de controle de altura da lâmina, com o intuito de deter a bomba e entrar em tempo de drenagem em caso de que a lâmina da água exceda a altura máxima do reservatório da mesa (60 mm).

No subsistema da lâmina, na figura 3, a primeira entrada é a vazão do sistema, que dependendo do momento, será de enchimento ou drenagem. Aquela vazão vai ser convertida a metros cúbicos por segundo. Sendo conhecida a capacitância da caixa (que neste caso é a área transversal do reservatório) a segunda entrada é a altura da lâmina calculada para com isso calcular a capacitância dos tubetes, a qual varia em função da altura tendo em conta a geometria cônica do tubete e a porosidade do substrato; onde a porosidade é o parâmetro que determina a capacitância que pode ser ocupada efetivamente pela água. Assim, em função da lâmina de água é calculada a capacitância dos tubetes; posteriormente, são realizadas as correspondentes conversões de unidades e multiplicasse pela porosidade, resultado que vai ser subtraído da capacitância total do reservatório para modelar a capacitância útil do sistema. Este resultado vai ser o denominador das operações feitas na vazão de entrada, obtendo assim uma altura por segundo que depois é integrado para simular a variação da lâmina de água no tempo.

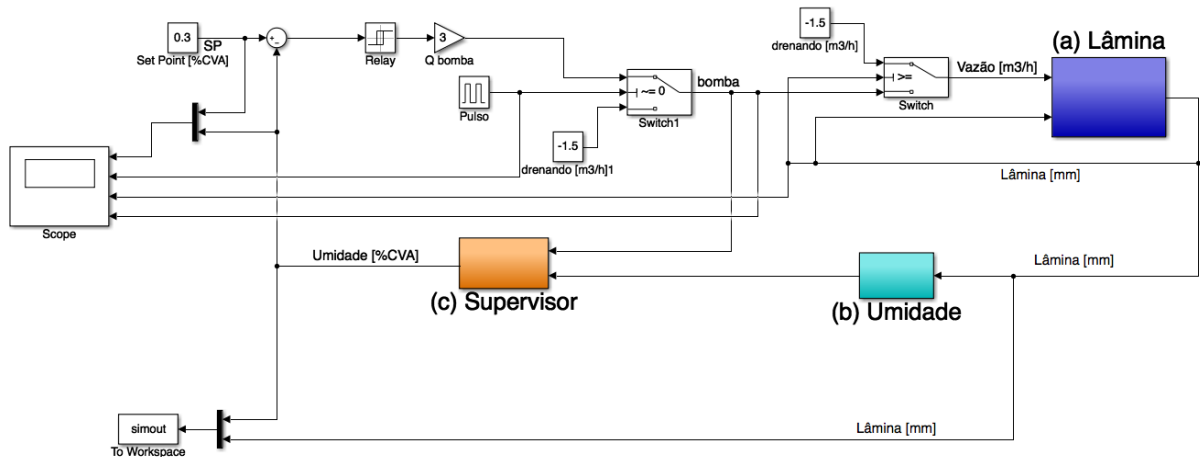


FIGURA 2. Modelo em bloco do sistema de subirrigação; (a) lâmina, (b) umidade e (c) supervisor

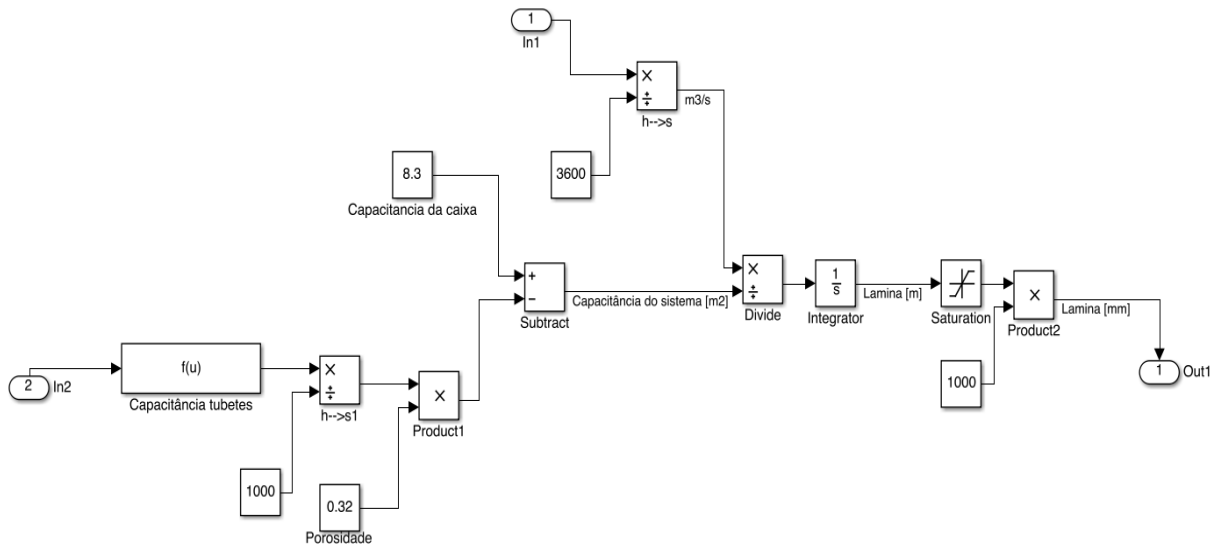


FIGURA 3. Modelo em bloco do subsistema da lâmina.

Para a implementação da parametrização do comportamento dinâmico do umedecimento (figura 4), utilizaram-se as equações 2 e 3 para calcular em função da lâmina o ganho estático e o tempo de estabilização. Tendo em conta a variabilidade dos parâmetros do sistema, não é possível caracterizar o sistema com uma função de transferência, desta forma foi implementada uma solução iterativa para o cálculo do CVA em função da lamina.

No subsistema supervisor, apresentado na Figura 5, tem-se como primeira entrada a vazão proveniente do primeiro chaveamento, sinal na que é implementada uma detecção de incremento. A segunda entrada é a umidade (CVA) previamente calculada que vai ser submetida a uma dinâmica de saturação, tendo como saída um CVA sempre maior ao CVA máximo de estabilização o qual está dado pelo modelo apresentado, sendo este o CVA de saída do subsistema e o CVA final para ser efetuado o controle do sistema. O máximo vai ser resetado quando seja detectado um incremento e o CVA seja maior que zero.

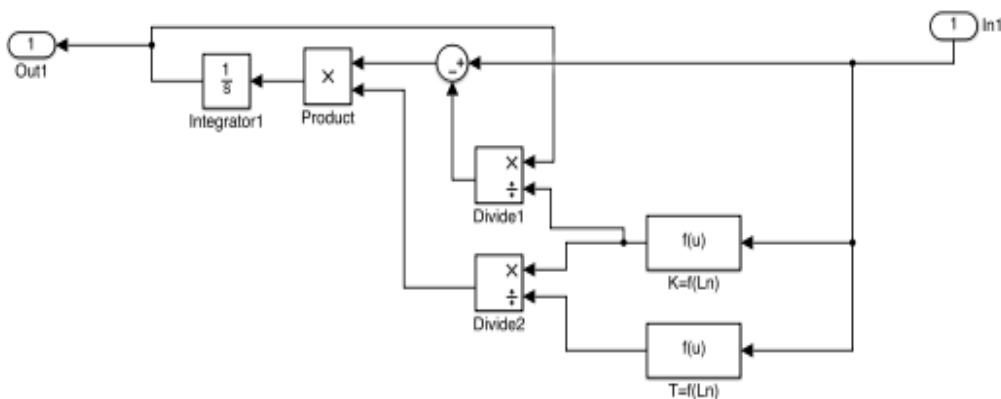


FIGURA 4. Modelo em bloco do subsistema da unidade. Ln1 representa a entrada da lamina neta para o subsistema, o out 1 representa a saída do subsistema, correspondente ao CVA resultante.

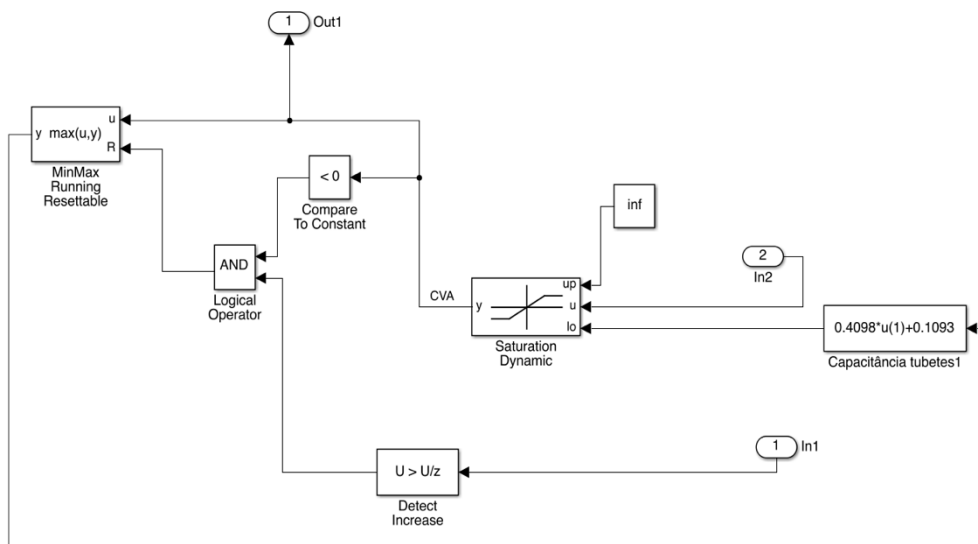


FIGURA 5. Modelo em bloco do subsistema supervisor.

Para avaliar o resultado da simulação é usado o bloco de *scope*, para obter os gráficos de comportamento dos parâmetros de *setpoint*, CVA, pulso, altura da lâmina e atuação da bomba. Nos gráficos apresentados do *scope* dentro da figura 6, onde apresentasse a dinâmica entre o CVA e o *setpoint*, vendo como o CVA vai flutuar dentro do umbral definido e controlado pelo *relay*. É importante salientar que a umidade não desce mais do que a umidade correspondente a capacidade de retenção de umidade do solo. Os pontos onde a umidade é puxada para fora da janela, corresponde à ação do pulso para gerar o momento de areação do substrato para não afeitar negativamente o desenvolvimento da cultura.

Observa-se também a variação da lâmina de água dentro do reservatório e como sua dinâmica é conforme ao controle baseado no CVA, o comportamento da bomba e o pulso. É importante salientar como se geram momentos de enchimento, drenagem e existe também o tempo de areação onde a lamina é drenada totalmente e se mantém o reservatório sem nível. Se se atenta para a dinâmica da bomba e sua relação com o umbral definido para o controle do CVA, conseqüentemente entre menor seja o umbral de erro permitido no controle, maior será a frequência de mudança de estado da bomba e menor será a variação do nível no reservatório.

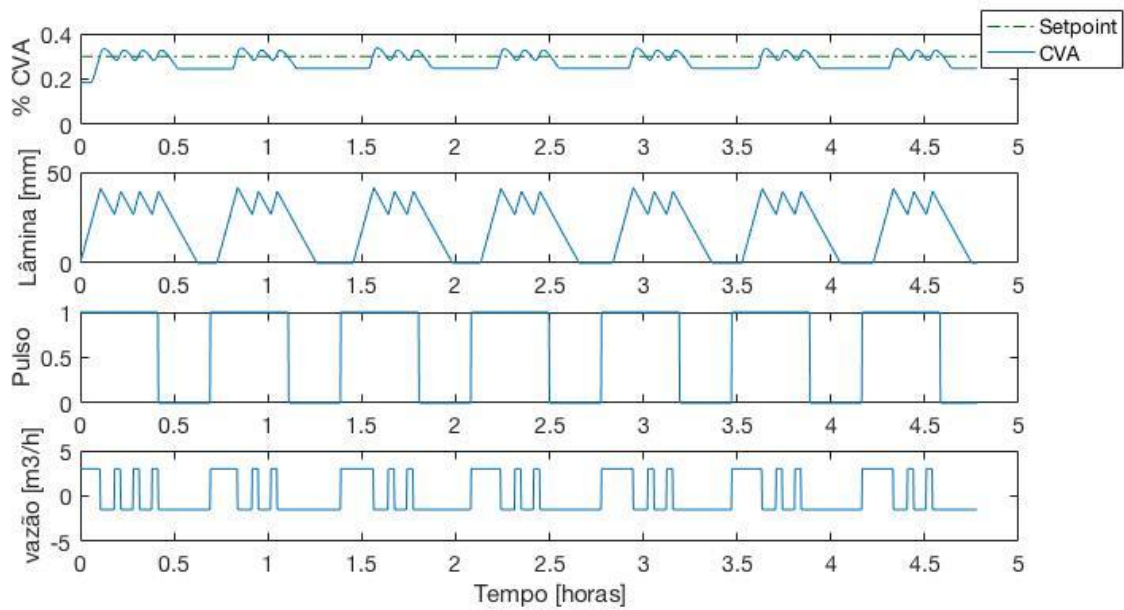


FIGURA 6. Resultado da simulação do modelo em bloco do sistema de subirrigação.

Efeituou-se também a simulação do sistema controlado com um temporizador, no qual se realiza uma irrigação por pulsos, seguindo os conceitos tradicionais de irrigação sem controle baseado em sensores de solo (*Feedback*). Com esta simulação se geram dados suficientes para avaliar e comparar a eficiência do sistema de controle proposto para o sistema de subirrigação em casa de vegetação.

Na simulação do sistema de irrigação temporizado implementaram-se os mesmos blocos de modelagem de lamina, umidade e sistema supervisor. Efeituou-se uma lógica de temporização e em função desta se gerou a configuração do controle da subirrigação, seguiram-se todas as mesmas características da casa de vegetação. A simulação foi realizada por um período de 5 horas para os dois sistemas, garantindo quatro momentos de irrigação para a simulação da irrigação por pulsos e com aqueles dados efetuaram-se as comparações (Figura 7).

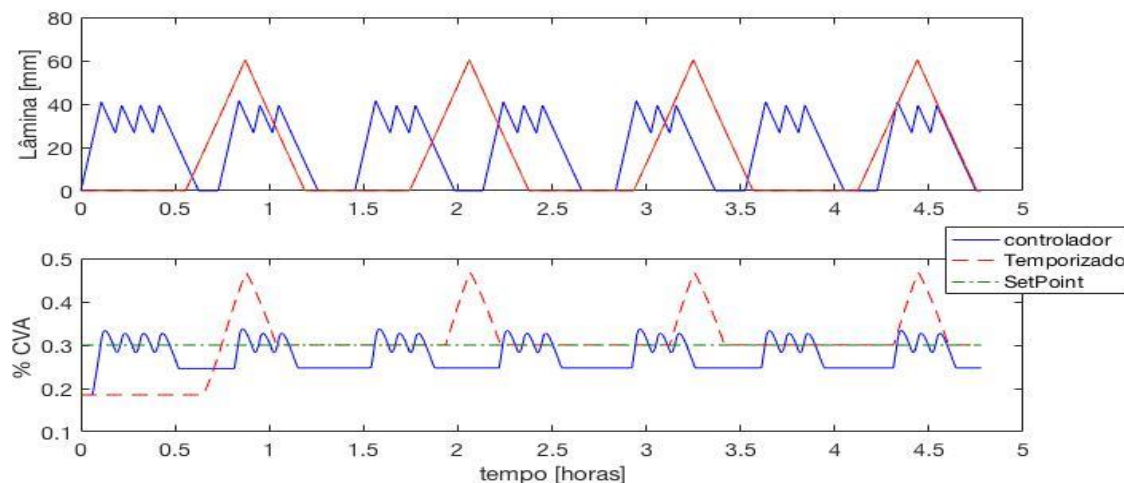


FIGURA 7. Comparação dos desempenhos das estratégias de controle.

Na tabela 2 estão sumarizadas as estatísticas dos controles por tempo e controlador. Observa-se que o modelo por temporização proporciona uma maior dispersão dos dados, conforme informações do RMSE e desvio padrão. Contudo, o mesmo modelo apresenta uma subestimação na média menor comparada ao modelo por controlador, de acordo com MBE. A média do erro relativo foi inferior no modelo por temporização em comparação ao modelo por controlador.

No sistema proposto (controlador na tabela 2), a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e o desvio padrão são menores em virtude dos valores de conteúdo volumétrico de água (CVA) ficarem em torno do *setpoint*, refletindo fisicamente em um maior tempo de permanência do sistema oscilando ao redor do *setpoint* e se ficando próximo do valor de CVA, determinado pelo usuário, quando comparado com o sistema de temporizador, o qual vai superar amplamente esse *setpoint* em cada pulso de irrigação pois o critério de pausa é unicamente a lâmina atingida na mesa e não o CVA desejado.

TABELA 2. Estatística dos modelos de controle por tempo e on/off.

Modelo	RMSE	MBE	Desvio padrão	ER(%)
Temporizador	0,0737	0,0101	0,0730	3,3801
Controlador	0,0432	0,0253	0,0351	8,4367

RMSE = raiz quadrada do erro médio quadrático, MBE = erro de viés médio, ER(%) = erro relativo percentual.

Em comparação com o trabalho de Melo Júnior et al. (2013) que definiu sua variável de controle como a massa do recipiente (tubete + substrato + água), para determinar a quantidade e o momento da irrigação, a simulação do sistema de controle proposto neste trabalho, foi correspondente aos resultados dos autores Melo Júnior *et al.* (2013), resultando na correta aplicação dos níveis de lâmina de água, atendendo a demanda hídrica das mudas e, resultando em um maior número de irrigações realizadas no período de análise devido ao feedback do sistema.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam uma melhora qualidade de irrigação ao se utilizar um sistema de controle, em malha fechada, baseado no monitoramento CVA, em comparação com o sistema de irrigação tradicional, baseado por pulsos temporizados. A modelagem dinâmica do umedecimento do substrato se mostrou uma ferramenta fundamental para a simulação de diferentes estratégias de controle, para que se possa avaliar, por meio de simulações, possíveis ganhos de qualidade de irrigação.

## REFERÊNCIAS

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011;

FERRAREZI, R. S. & VAN IERSEL, M. W. Monitoring and controlling subirrigation with soil moisture sensors: a case study with hibiscus. *Proceedings of SNA Research Conference*, Water Management Section, v.56, p.187-191, 2011.

FERREIRA FILHO, A. C.; TESTEZLAF, R. et al. Efeito da altura de aplicação de água e do tempo de subirrigação na umidade da casca de pinus em tubetes. In: XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2012, Londrina, Paraná, Brasil. **Trabalho publicado em anais de evento**. Jaboticabal, São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, 2012.

GAMO, M. Classification of arid regions by climate and vegetation. **Journal of Arid Land Studies**, 1, 1999. 9-17.

GERVÁSIO, E.S. Efeito de lâminas de irrigação e doses de condicionador, associadas a diferentes tamanhos de tubetes, na produção de mudas de cafeeiro. Piracicaba, 2003. 105p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

KIA, P. J. et al. Intelligent Control Based Fuzzy Logic for Automation of Greenhouse Irrigation System and Evaluation in Relation to Conventional Systems. **World Applied Sciences Journal**, 6, n. 1, 2009. 16-23.

LEMAIRE, F.; DARTIGUES, A.; RIVIÉRE, L.M. CHARPENTIER, S. Cultures an pots at conteneurs. Paris:INRA/PHM Revue Horticole, 1989. 184p.

LOPES, J. L.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substrato. *Revista Árvore*, v.31, n.5, p835-843, 2007.

MELO JUNIOR, J. C. F. et al. Sistema de automação para o manejo da subirrigação em ambiente protegido. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, Botucatu, 18, n. 2, 2013. 337-350.

MELO JUNIOR, J. C. F. et al. Efeito de níveis de depleção de água no substrato e doses de fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de maracujazeiro amarelo. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, Botucatu, 20, n. 2, 2015. 204-219.

TERUEL, B. Controle automatizado de casas de vegetação: Variáveis climáticas e fertigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 237-245, 2010.

ZAZUETA, F. S.; SMAJSTRLA, A. G.; CLARK, G. A. **Irrigation system controllers**. [S.l.]: Institute of Food and Agriculture Science, 1994.