

DESEMPENHO DE LÓGICAS DE CONTROLE PROPORCIONAL PARA O AJUSTE AUTOMÁTICO DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA

CONAN A. SALVADOR¹, MARINALDO F. PINTO², EZEQUIEL SARETTA³, VANESSA DE F. GRAH³, TARLEI A. BOTREL⁴

¹Eng^o Agrícola, Doutor em Irrigação e Drenagem, LEB – Depto. Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, Piracicaba - SP, Fone: (0XX19) 3447.8549, conan@usp.br.

² Eng^o Agrícola, Pesquisador, INCT-EI - ESALQ/USP, Piracicaba - SP.

³ Eng^o Agrônomo, Doutorando, LEB/ESALQ/USP, Piracicaba – SP.

³ Eng^o Agrícola, Prof. Titular, LEB/ESALQ/USP, Piracicaba – SP.

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014 - Campo Grande - MS, Brasil

RESUMO: Novas estratégias de reposição de nutrientes em soluções nutritivas aplicadas a hidroponia estão sendo estudadas com a disponibilidade de eletrodos de íons específicos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de cinco lógicas de controle proporcional de um sistema automático de ajuste da concentração de nitrato em solução nutritiva. O sistema foi instalado numa bancada hidropônica, composta por um dispositivo eletrônico de controle, um sensor seletivo a íons de nitrato e um sistema de injeção de solução concentrada. As lógicas empregadas LP1, LP2 e LP3 eram funções lineares do erro e, LP4 e LP5 eram funções potenciais. Realizaram-se testes de ajuste considerando-se concentrações inicial e final de nitrato de aproximadamente 560 mg L⁻¹ e 780 mg L⁻¹, respectivamente, sob vazão constante (356 L h⁻¹), com injeção de solução concentrada (20000 mg L⁻¹) e medição da concentração instantânea à jusante do bombeamento. Os resultados demonstraram que as lógicas LP1, LP2 e LP5 foram eficientes no ajuste da concentração quando considerados os índices baseados no erro. Em contrapartida, LP4 apresentou menor tempo para ajustar a concentração da solução ao valor desejado, necessitando-se ajustar empiricamente o tempo de abertura da válvula injetora.

PALAVRAS-CHAVE: eletrônica, eletrodo de íon seletivo, hidroponia.

PERFORMANCE OF PROPORTIONAL CONTROL LOGICS FOR AUTOMATIC ADJUSTMENT OF NITRATE CONCENTRATION IN NUTRIENT SOLUTION

ABSTRACT: The recent progresses of ion-selective electrodes allow new developments of strategies for nutrient supply in solutions applied in hydroponic systems. Thus, the purpose of this work was to evaluate the performance of five proportional control logics of an automatic system of adjustment of nitrate concentration in nutrient solution. The system was installed at a hydroponic bench, comprising an electronic device of control, a nitrate ion-selective sensor and a system for concentrated solution injection. Control logics applied LP1, LP2 and LP3 were linear functions of the error, and LP4 and LP5 were potential functions. Tests were performed considering the initial nitrate concentration of around 560 mg L⁻¹ and the final 780 mg L⁻¹; with constant flow of 356 L h⁻¹, injection of 20000 mg L⁻¹ solution and measuring instant concentration downstream of the pumping. The results obtained showed that LP1, LP2 and LP5 logics were effective in the adjustment of the concentration when considering the indices based on the error. On the other hand, LP4 presented the shorter time to adjust the concentration of the solution to the desired value, which needed empirical adjusts of opening time of the injector valve.

KEYWORDS: electronics, ion-selective electrode, hydroponics.

INTRODUÇÃO: A agricultura irrigada está cada vez mais intensa e tecnificada, sendo ancorada na busca pela otimização da lavoura e minimização de efeitos adversos ao ambiente. Assim, também existe demanda por ferramentas que auxiliem tanto no controle de processos quanto na tomada de decisões relevantes e oportunas (ALENCAR et al., 2007; SOUZA e BOTREL, 2009). Ferramentas de controle como os controladores proporcional integrativo derivativo (PID) foram amplamente estudados e são utilizados pelos setores da indústria (GOSMANN, 2002; O'DWYER, 2009), apresentando grande potencial de aplicação no controle de sistemas de irrigação (PINTO et al., 2013). No caso dos sistemas que utilizam fertirrigação, como a hidroponia, a reposição de nutrientes na solução nutritiva, evitando-se o desbalanço entre suas concentrações, é um desafio aos produtores. A disponibilização de sensores como os eletrodos de íon específico, permite explorar novas estratégias de controle de nutrientes, conforme controlador de nitrato em solução nutritiva desenvolvido por Salvador (2014). Os controladores cujo modo de controle é contínuo podem ser dos tipos proporcional, integrativo e derivativo, que combinados originam o controlador PID. A ação de controle é baseada na diferença entre o valor instantâneo da variável de controle e o de referência, denominado *setpoint* (LEITE et al., 2010). No controle proporcional a ação de controle é diretamente proporcional a essa diferença, cujo parâmetro é a constante de proporcionalidade (K_p), a qual deve ser ajustada empiricamente. O desempenho dos controladores é avaliado por indicadores como o tempo de assentamento (t_A), tempo de duplicação (t_0), tempo de subida (t_s), e índices integrativos (IEA, IEQ, IEAT) (FACCIN, 2004). Diante do exposto, este trabalho teve o objetivo de avaliar o desempenho de lógicas de controle proporcional no ajuste de concentração de nitrato em solução nutritiva.

MATERIAL E MÉTODOS: O dispositivo eletrônico de controle (DEC) utilizado, desenvolvido por Salvador (2014), realiza o ajuste automático da concentração de nitrato em solução nutritiva injetando solução concentrada por meio de atuadores. Para tanto, baseia-se em leituras da concentração instantânea com um sensor (eletrodo de íon específico para nitrato). O DEC foi instalado em uma bancada de hidroponia que continha um reservatório de 180 L e bombas que asseguravam uma vazão constante de 356 L h⁻¹. À jusante do reservatório instalou-se uma unidade de leitura para fixação do sensor, e à montante, na tubulação de retorno, instalou-se o sistema de injeção, composto por um pequeno reservatório para solução concentrada (de 20000 mg L⁻¹ de KNO₃) e duas válvulas solenoides. Preparava-se 120 L de solução nutritiva (no reservatório hidropônico) seguindo a recomendação proposta por Furlani et al. (1999) para hortaliças folhosas em cultivo hidropônico tipo NFT (nutrient film technique), com concentração de 560 mg L⁻¹ de nitrato, excluindo-se o nitrato de potássio (KNO₃), pois este compunha a solução de injeção. Realizava-se a calibração do sensor segundo o método de Lemos et al. (2007) adaptado e seguindo as recomendações do manual do sensor, utilizando-se seis soluções com concentração conhecida (padrões) abrangendo a faixa de medição das amostras a ser estimadas. As soluções padrão foram preparadas com nitrato de sódio (NaNO₃) nas concentrações de 400, 500, 600, 700, 800 e 900 mg L⁻¹, uma vez que nas avaliações da automação o DEC deveria ajustar a solução de para 780 mg L⁻¹. Essa concentração final é equivalente a 172 mg L⁻¹ de N, que é próximo ao recomendado para sistemas NFT com cultivo de hortaliças folhosas. O controle do sistema de injeção operava por meio do cálculo do tempo de abertura da válvula solenoide (T_a) responsável pela injeção de solução de alta concentração. A lógica foi baseada na diferença (E) existente entre a concentração de ajuste desejada e a concentração instantânea, medida pelo DEC. O T_a era limitado em um valor máximo de 1,99 s e mínimo de 0,04s, determinados empiricamente, e adotou-se 19 s de duração de cada ciclo de ação do controlador. Para o cálculo do T_a pelo controle proporcional multiplicava-se “E” pelo coeficiente de proporcionalidade (K_p). Cada lógica de controle correspondia a uma equação de K_p , apresentadas nas Eq. 16 à 20, das quais se buscou exatidão e rapidez no controle.

$$\text{LP1:} \quad K_p = 1 + 9 * \left(\frac{E}{E_1} \right) \quad T_a = K_p * E \quad (16)$$

$$\text{LP2:} \quad K_p = 1 + 3 * 2^2 * \left(\frac{E}{E_1} \right) \quad T_a = K_p * E \quad (17)$$

$$\text{LP3:} \quad K_p = 1 + 4^2 * \left(\frac{E}{E_1} \right) \quad T_a = K_p * E \quad (18)$$

$$\text{LP4:} \quad Kp = 1 \quad Ta = Kp * E^2 \quad (19)$$

$$\text{LP5:} \quad Kp = 1 + 9 * \left(\frac{E}{E_1}\right) \quad Ta = Kp * E^{1.5} \quad (20)$$

Para a determinação do desempenho do controlador adaptou-se a metodologia de Faccin (2004), tendo em vista que nos cálculos da diferença E devia-se considerar o valor de referência (780 mg L⁻¹). Como um Ta mínimo foi inserido na lógica, valores de E que eram cobertos por essa faixa de tempo não permitem uma ação de controle e, dessa forma, não se considerou essa faixa de penalização.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Na Figura 1 apresentam-se as respostas das lógicas de controle avaliadas. Percebe-se que ocorreu a presença de ruídos no sinal de resposta, os quais são caracterizados por picos que não condizem com os demais valores presentes na mesma lógica testada. Esses ruídos foram provocados pela formação de bolhas de ar na adução da solução bombeada à unidade de leitura. No entanto, os mesmos não afetaram a sequência de atuação do DEC ao longo do tempo. As concentrações das soluções do sistema, preparadas para os testes, apresentaram variações nas leituras do sensor de até 28,4 mg L⁻¹, apresentando o valor médio de 563 mg L⁻¹. Contudo, o efeito dessa variação da concentração inicial pode ser considerado irrelevante no teste das lógicas de controle, pois representa cerca de 5% de desvio.

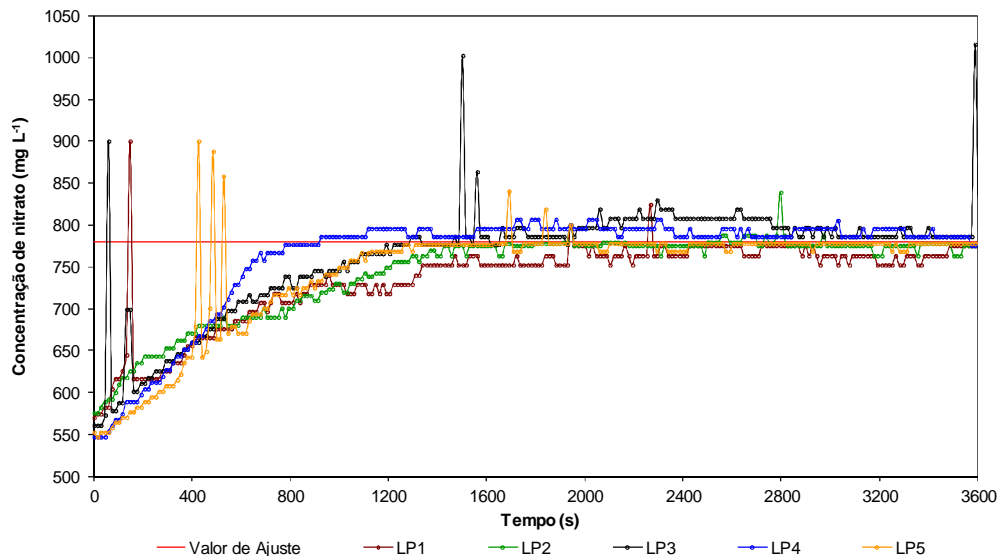


FIGURA 1. Resposta do controlador para diferentes lógicas de controle proporcional.

Como foram testadas lógicas proporcionais com equações de cálculo de Ta diferentes, e considerando um Ta mínimo, os valores de referência de encerramento da atuação também foram diferentes, com valores de 764, 765, 766, 774, 769 mg L⁻¹ para as lógicas LP1, LP2, LP3, LP4 e LP5, respectivamente (Figura 1). Na Tabela 1 são apresentados os valores dos índices de desempenho, salientando-se que para o cálculo dos mesmos foram excluídos os prováveis *outliers* (ruídos), a fim de não se mascarar os resultados de cada equação. Para tal, utilizou-se um critério visual, descartando-se valores que não atendiam a sequência de ajuste no tempo.

A LP4 promoveu o assentamento do sinal de resposta na faixa de $\pm 5\%$ do valor de referência em 604 s (tempo de assentamento), sendo o primeiro erro nulo, conferido pelo tempo de duplicação, obtido em 780 s; com tempo de subida de 503 s, quando passa de 10 a 90% do valor de referência. Em compensação, a LP2 proporcionou os menores valores para a integral do erro absoluto e do erro quadrático, o que se justifica por ajustes intensos para erros maiores, e suaves quando apresentava erros menores. Com relação à integral do erro absoluto integrado no tempo, a LP5 promoveu o menor valor, que se deve a melhor estabilidade do controle após atingir o valor de referência. Percebe-se na Figura 1 que a LP3 e a LP4 ultrapassaram o valor de referência durante a ação do controlador, apresentando valores mais altos da integral do erro absoluto ponderado pelo tempo. Como se sabe, tal

critério penaliza erros que se mantém no tempo, tanto para valores superiores como inferiores ao valor de referência. Esse resultado revelou que o Ta mínimo utilizado foi inadequado para essas lógicas, requerendo a regulação do mesmo por meio de testes empíricos, para o aprimoramento dessas lógicas. Nos casos em que se pretende realizar rapidamente o controle da concentração de nitrato, a LP4 seria a mais indicada. Contudo, torna-se necessário realizar testes empíricos para se determinar o Ta mínimo que permite o controle dentro do limite especificado.

TABELA 1. Índices de desempenho para as lógicas avaliadas

Lógica	Tempo de assentamento (s)	Tempo de duplicação (s)	Tempo de subida (s)	Integral do erro absoluto ($\times 10^3$)	Integral do erro quadrático ($\times 10^3$)	Integral do erro absoluto ponderado no tempo ($\times 10^3$)
LP1	883	1530	1266	7,8	806,8	4405,8
LP2	1044	1368	1114	7,1	744,7	3433,9
LP3	839	1090	794	8,4	809,2	7925,9
LP4	604	780	530	8,4	968,6	6314,9
LP5	912	1310	854	7,9	1169,3	2907,8

CONCLUSÕES: Todas as lógicas avaliadas foram eficientes no controle da concentração de nitrato para o valor especificado. A LP4 apresentou melhor desempenho quanto aos índices que consideram o tempo como parâmetro, enquanto que as lógicas LP1, LP2 e LP5 foram eficientes quando considerados os índices baseados no erro. Adicionalmente, destaca-se que a LP4 é a mais indicada nos casos em que se pretende realizar o controle rapidamente, necessitando-se apenas ajustar empiricamente o tempo de abertura da válvula injetora.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo apoio financeiro a essa pesquisa, por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI). Também, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, C.A.B; CUNHA, F.F.; RAMOS, M.M.; SOARES, A.A.; PIZZILO, T.A.; OLIVEIRA, R.A. Análise da automação em um sistema de irrigação convencional fixo por miniaspersão. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.15, n.2, p.109-118, 2007.
- FACCIN, F. *Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID*. Porto Alegre, 2004. 124p. Dissertação de Mestrado.
- FURLANI, P.R.; SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. *Cultivo hidropônico de plantas*. Campinas: IAC, 1999. 52p.
- GOSMANN, H.L. *Um sistema multivariável de tanques acoplados para avaliação de técnicas de controle*. Brasília, 2002. 78p. Dissertação de Mestrado.
- LEITE, M.S.; FILETI, A.M.F.; SILVA, F.V. Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e PID convencional em um bioprocessos. *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 2, p. 147-158, 2010.
- LEMO, S.G.; NOGUEIRA, A.R.A.; TORRE-NETO, A.; PARRA, A.; ALONSO, J. Soil calcium and pH monitoring sensor system. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, California, v.55, n.12, p. 4658-4663, 2007.
- O'DWYER, A. *Hand book of PI and PID controller tuning rules*. London: Imperial College Press, 2009. 608p.
- PINTO, M.F.; SALVADOR, C.A.; CAMARGO, A.P.; ALVES, D.G.; BOTREL, T.A. Desempenho de lógicas de controle para ajuste automático do pH da água utilizada em microirrigação. *Irriga*, Botucatu, v.18, p. 708-720, 2013.
- SALVADOR, C.A. *Desenvolvimento e avaliação de um sistema de controle de nitrato em soluções nutritivas*. Piracicaba, 2014. 104p. Tese de Doutorado.
- SOUZA, R.O.R.M; BOTREL, T.A. Desenvolvimento e avaliação de sistema de sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais. *Irriga*, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 365-382, 2009.