

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE NITRATO EM SOLUÇÕES NUTRITIVAS

CONAN A. SALVADOR¹, MARINALDO F. PINTO², EZEQUIEL SARETTA³, DINARA G. ALVES³, TARLEI A. BOTREL⁴

¹ Eng^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: O objetivo do presente trabalho foi desenvolver e avaliar um sistema de controle automático de nitrato em solução nutritiva. O sistema desenvolvido constou, basicamente, de um Dispositivo Eletrônico de Controle (DEC), um sensor seletivo a íons de nitrato e um sistema de injeção de solução concentrada. Por meio do sensor, o DEC foi programado para manter a concentração de nitrato em um valor estabelecido pelo usuário, por meio da injeção de solução. O sistema foi testado em bancada hidropônica, com valor inicial de concentração de nitrato na solução nutritiva (525 mg L^{-1}), sob vazão constante (356 L h^{-1}), sendo realizada a injeção de solução de alta concentração de nitrato (30000 mg L^{-1}) no retorno de solução ao reservatório e a medição da concentração instantânea à jusante do bombeamento. Realizaram-se ensaios para diferentes valores finais da concentração (780 e 1002 mg L^{-1}), sendo coletadas amostras de 15 mL em tempos definidos, determinando-se a concentração de nitrato no espectrofotômetro. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência da lógica de controle aplicada na automação, além do desempenho satisfatório do sistema em manter a concentração no intervalo desejado, ajustando o valor cerca de 12 e 22 minutos, respectivamente, após o início dos testes.

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

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A CONTROL SYSTEM OF NITRATE IN NUTRIENT SOLUTIONS

ABSTRACT: The objective of this study was to develop and evaluate an electronic system for automatic control of nitrate in nutrient solutions. The system consisted basically of an Electronic Control Module (ECM), a selective sensor of nitrate ions and a system for injection of concentrated solution. By monitoring the solution with the sensor, the ECM was programmed to maintain the concentration of nitrate at certain value set by the user, injecting concentrated solution. The system was tested at a hydroponic bench, with the initial concentration of the nitrate in the nutrient solution (approximately 525 mg L^{-1}), with constant flow (356 L h^{-1}), injecting concentrated solution of nitrate (30000 mg L^{-1}) in the solution returned to the reservoir and measuring the instant concentration downstream of the pumping system. Tests were done for different final values of the concentration in the reservoir (780 and 1002 mg L^{-1}), collecting samples to determine the concentration of the nitrate with the spectrophotometer. The results obtained proved the efficiency

of the control logic applied in the automation, besides the satisfactory performance of the system in maintaining the concentration within a desired range, adjusting the value between 12 and 22 minutes after the beginning of the tests.

KEYWORDS: automation, ion-selective electrode, hydroponics.

INTRODUÇÃO

Em contrapartida ao crescimento populacional, a expansão das áreas cultivadas é limitada e os recursos naturais são finitos, dentre eles os hídricos (ROMERO et al., 2012). Dessa forma, a agricultura deve se tornar cada vez mais intensa e tecnificada, buscando-se a maximização do rendimento das culturas e a otimização do uso de recursos, em especial, fertilizantes e água. Nesse sentido, o cultivo hidropônico tem se destacado devido perspectiva de alta produtividade em espaço limitado, menor tempo de produção e utilização eficaz dos insumos (KOBAYASHI et al., 2013).

Em hidroponia a reposição de nutrientes é feita via solução nutritiva, porém o balanço das concentrações ainda é um desafio aos produtores (BLAIR & TAYLOR, 2004). Nesses sistemas fechados, o desequilíbrio entre a absorção das plantas e a concentração iônica pode gerar decréscimos na concentração de alguns íons, como amônio, potássio e nitrato, e por outro lado, o acréscimo na concentração de íons como sódio, cloreto, sulfato e cálcio (GUTIÉRREZ et al., 2007). Atualmente, parte majoritária dos produtores utiliza o controle da concentração salina mediante ao monitoramento da condutividade elétrica como estratégia de manejo químico de soluções nutritivas (HELBEL JUNIOR et al., 2008; DARTER et al., 2009; DOMINGUES et al., 2012). Contudo, a leitura fornecida por condutivímetros não discrimina a concentração de cada nutriente, não permitindo correções individuais, em resposta à demanda da cultura em tempo real (KIM et al., 2013; GUTIÉRREZ et al., 2007; BAMSEY et al., 2012).

Com o desenvolvimento e comercialização de sensores como eletrodo de íon-seletivo (ISE), abriu-se caminho para elaboração de novas estratégias de monitoramento e controle da aplicação de fertilizantes para as culturas. Existem precedentes do desenvolvimento de sistemas de controle de soluções nutritivas baseado nesses sensores por mais de 25 anos (BAILEY et al., 1988; GIELING et al., 2005; GUTIÉRREZ et al., 2007; BAMSEY et al., 2012; STEIDLE NETO et al., 2014), contudo, a busca por um sistema de controle prático e de fácil aceitação por parte dos produtores agrícolas, além da disponibilização de sensores robustos e de baixo custo ainda não foi alcançado e seu uso tem se restringido a pesquisa. Adicionalmente, aliados a sistemas automatizados, com o emprego da eletrônica, as vantagens deste tipo de sensor são potencializadas no tocante ao gerenciamento da produção agrícola (DOMINGUES et al., 2012).

Torna-se relevante a iniciativa por contribuições científicas que auxiliem tanto o controle de processos quanto a tomada de decisões aplicadas à agricultura, devido a grande demanda existente nesse setor (ALENCAR et al., 2007). Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver e avaliar um sistema de controle automático da concentração de nitrato em soluções nutritivas.

MATERIAL E MÉTODOS

Buscando-se a funcionalidade prática do dispositivo, as seguintes fundamentações orientaram sua construção, a saber: funcionamento independente de um computador ou equipamentos adicionais; simplicidade na operação e na interface com o usuário; e, portabilidade.

O sistema constou, basicamente, de um dispositivo eletrônico de controle (DEC), desenvolvido por Salvador (2014), que processa o sinal de um sensor e aciona atuadores (válvulas solenoides); um sensor seletivo a íons de nitrato; e, um sistema de injeção de solução concentrada comandado pelo DEC. O dispositivo foi desenvolvido empregando-se um microcontrolador para gerenciamento, com possibilidade de comunicação com computador, via serial RS-232. O software programado no microcontrolador permitia exibir e acessar menus, rotinas de calibração do ISE,

controle da concentração do nitrato, medições instantâneas de concentração, e configurações. Para tais funcionalidades, possuía interface amigável com o usuário, por meio de LCD (Liquid Cristal Display) e botões de navegação.

O eletrodo de íon específico de nitrato utilizado se trata de um sensor potenciométrico combinado, composto de um eletrodo de referência e outro indicador. Quando imerso em uma solução que contem nitrato, o eletrodo indicador proporciona uma diferença de potencial com relação ao eletrodo de referência, que era medida pelo DEC e convertida em concentração, conforme a equação do sensor, obtida na realização da rotina de calibração. As principais características do eletrodo combinado de nitrato podem ser verificadas na Tabela 1.

TABELA 1. Características do sensor seletivo a íons de nitrato. **Selective sensor of nitrate ions characteristics.**

Parâmetro	Característica do sensor de nitrato	Íons interferentes
Dimensões	12 mm x 120 mm	Fluoreto (F ⁻) - maior ou igual a 300 mg L ⁻¹
Ligação	BNC	Cloreto (Cl ⁻) - maior ou igual a 100 mg L ⁻¹
Tipo químico	Membrana de PVC com permutador de íon orgânico	Carbonato (CO ₃ ²⁻) - maior ou igual a 4 mg L ⁻¹
Sistema de referência	Ag/AgCl + eletrolítico Cl em gel	Nitrito (NO ₂ ⁻) - maior ou igual a 2 mg L ⁻¹
Faixa de medição	0,1 mol L ⁻¹ a 1x10 ⁻⁵ mol L ⁻¹	Iodeto (I ₂ ⁻) - maior ou igual a 0,01 mg L ⁻¹
Temperatura	0 a 40 °C	Perclorato (ClO ₄ ⁻) - maior ou igual a 0,0045 mgL ⁻¹
pH	3 a 8	

Fonte: Adaptado de Hanna Instruments.

Realizava-se a calibração do eletrodo de nitrato segundo método de Lemos et al. (2007) adaptado e seguindo as recomendações do manual do sensor. Dessa maneira, seis padrões de calibração foram elaborados com nitrato de sódio (NaNO₃) com concentrações de 400, 500, 600, 700, 800 e 900 mg L⁻¹, para a concentração de ajuste era 780 mg L⁻¹, e 400, 600, 800, 1000, 1200 e 1400 mg L⁻¹ para 1002 mg L⁻¹, abrangendo toda faixa de medição das amostras utilizadas nos testes em laboratório. Portanto, ao final do processo de calibração armazenavam-se seis valores e, em seguida, ajustava-se o modelo de equação exponencial correlacionando o valor da concentração e com a leitura interna do microcontrolador. Um cuidado que se tinha antes da calibração era quanto à temperatura das soluções padrões e da solução nutritiva a ser aplicada, prevenindo-se que a diferença de temperatura fosse superior a 5 °C, conforme recomendação do fabricante.

Construiu-se uma bancada hidropônica tipo NFT (nutrient film technique) para os testes do sistema, seguindo-se as recomendações propostas por Furlani et al. (1999), adotando-se a cultura da alface para definição de especificações como vazão dos canais e volume do reservatório, embora não se tenham realizados estudos com enfoque fitotécnico. A cultura da alface foi selecionada por ser uma hortaliça de grande difusão entre os produtores hidropônicos (PÔRTO et al, 2012). Na Figura 1 observa-se o esquema da estrutura física utilizada para a realização dos ensaios experimentais.

Utilizou-se um reservatório de PVC com capacidade útil de 180 L. Os quatro perfis hidropônicos empregados (Figura 1) eram de polipropileno com aditivo anti-ultravioleta, formato trapezoidal e tamanho médio (100 mm), com comprimento de 2,85 m, instalados na bancada com um desnível de 0,10 m, conferindo uma declividade de 3,51 %. O espaçamento entre os perfis de 0,3 m, estando dentro dos limites apresentados por Martinez (2006) para a cultura da alface. O conjunto motobomba foi composto por duas eletrobombas de circulação com vazão de 1500 L h⁻¹, as quais foram instaladas na parte inferior do reservatório e em paralelo (Figura 1). Desse modo, atendeu-se com folga a indicação da vazão em cada canal de cultivo de 89 L h⁻¹ (para plantas de ciclo curto). Durante os ensaios, a vazão do sistema era controlada por meio da pressão na saída do sistema de bombeamento, por meio de sua equação vazão-pressão.

O retorno da solução para o reservatório foi feito de duas diferentes formas: pela tubulação de drenagem dos perfis hidropônicos, a qual foi composta por um perfil de recolhimento; e, pelo retorno instalado após as eletrobombas, na tubulação de recalque. No retorno instalou-se um

dispositivo tipo Venturi, buscando-se permitir a oxigenação adequada de todo volume no reservatório. A vazão era regulada por meio de um registro presente no retorno. A mistura adequada entre a solução do reservatório e a injetada pelo sistema de controle era garantida por seis bombas submersas no reservatório, com vazão unitária de 290 L h^{-1} . Além disso, instalou-se um filtro de tela de 120 mesh após as bombas de recalque, cuja finalidade era misturar a solução antes da leitura da concentração pelo sensor (Figura 1).

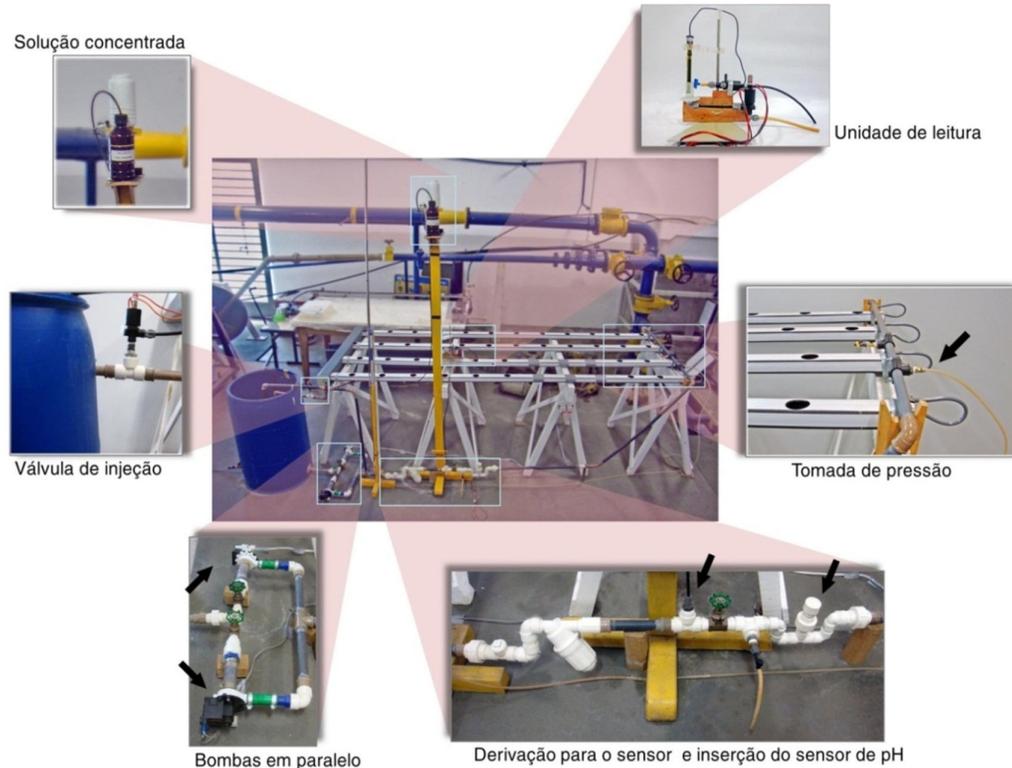


FIGURA 1. Bancada hidropônica tipo NFT para a realização dos ensaios experimentais com detalhes dos principais componentes utilizados.

O sensor ISE foi instalado em uma estrutura apropriada, denominada unidade de leitura (Figura 1). A mesma possibilitava reproduzir a situação de leitura convencional de amostras em laboratório, sendo composta de um reservatório tranquilizador (25 cm^3), uma haste rígida para fixação do sensor, duas válvulas solenoides, sendo uma para operação de adução e outra para operação de drenagem do reservatório tranquilizador. Dessa maneira, trocava-se a solução após cada medição, sendo necessário um volume de 5 mL . Considerando a mesma vazão que os testes de controle seriam realizados, verificou-se que a unidade de leitura possibilitou a realização da adução em $1,3 \text{ s}$ e da drenagem em 2 s , sendo a diferença devido à pressurização da válvula de adução.

Para o controle da concentração de nitrato desenvolveu-se um sistema de injeção de solução concentrada (30000 mg L^{-1} de KNO_3), composto basicamente por um reservatório de 1 L e uma válvula solenoide de três vias e tensão de acionamento de 24 Vca . O reservatório de solução concentrada foi fixado $1,65 \text{ m}$ acima do nível do reservatório da bancada, e a válvula foi instalada próxima a este, na tubulação de drenagem da bancada.

Um volume de 120 L de solução nutritiva com concentração conhecida de nitrato era preparada no reservatório da bancada, seguindo recomendações de Furlani et al. (1999) para hortaliças folhosas em cultivo hidropônico tipo NFT. Excluía-se o nitrato de potássio (KNO_3) que iria compor a solução de injeção. Com isso, a solução inicial continha cerca de 108 mg L^{-1} de nitrogênio (N), que corresponde a 488 mg L^{-1} de nitrato. Somando-se a concentração de nitrato presente na água (aproximadamente 12 mg L^{-1}) e a concentração devida aos sais adicionados, a concentração inicial de nitrato na solução seria em torno de 500 mg L^{-1} .

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 2,69 s e mínimo de 0,10 s, os quais foram determinados empiricamente. O ciclo adotado para cada ação do controlador teve duração de 20 s, o qual compreendia a leitura da concentração instantânea, cálculo de T_a , injeção de solução concentrada e troca de solução na unidade de leitura para o início de uma nova ação de controle. O cálculo do T_a foi realizado considerando o modo controle proporcional, o qual multiplica-se “ E ” pelo coeficiente de proporcionalidade (K_p). A equação 1 foi selecionada após um teste com diferentes equações, lineares e potenciais, buscando-se exatidão e rapidez no controle.

$$T_a = K_p * E^2 \quad (1)$$

em que,

k_p - coeficiente de proporcionalidade, considerado igual a 1.

A eficácia do sistema de automação proposto no controle da concentração de nitrato na solução aplicada foi verificada mediante a realização de uma série de testes. As concentrações de ajuste foram 780 e 1002 mg L⁻¹, tendo em vista que esses valores correspondiam a incrementos de cerca de 59 e 109 mg L⁻¹ de N em relação à solução inicial, faixa comum em aplicação hidropônica. Para cada valor de ajuste foram realizadas quatro repetições (E1, E2, E3 e E4), objetivando-se ter repetibilidade nos resultados obtidos. A coleta de dados foi feita por meio da porta serial do controlador e armazenado em um microcomputador com o auxílio de um programa para o computador desenvolvido em Linguagem Pascal. Era armazenado para cada teste um relatório no formato de arquivo “*.txt” com as variáveis: tempo instantâneo (s), tempo acumulado (s), T_a (ms) da válvula de injeção, concentrações atual (mg L⁻¹), concentração desejada (mg L⁻¹) e K_p . Os dados eram enviados ao software pelo microcontrolador após cada ação de controle a uma taxa de transferência de 9600 bits s⁻¹.

Buscando-se comprovar as leituras realizadas pelo sensor, em cada ensaio coletavam-se amostras de 15 mL de solução em tempos preestabelecidos. Realizaram-se oito pontos de coletas, em triplicata. Como se previa que os ensaios teriam tempos de ajuste diferenciados, os pontos de coletas foram espaçados no tempo de duração de modo a verificar a alteração da concentração no decorrer dos ensaios. Desse modo os tempos de coleta para cada um dos ajustes foram os seguintes: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 20 e 30 min (para a concentração de 780 mg L⁻¹); e 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 40 min (1002 mg L⁻¹). Determinou-se a concentração de nitrato das amostras coletadas segundo método descrito por Yang et al. (1998).

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 e 1002 mg L⁻¹). Como um T_a 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. Este artifício é comum em aplicações práticas, evitando-se chaveamentos indesejados, quando o E é próximo de zero. Os índices avaliados foram: tempo de assentamento (t_A); tempo de duplicação (t_0); e tempo de subida (t_s), integral do erro absoluto (IEA); integral do erro quadrático (IEQ); integral do erro absoluto ponderado pelo tempo (IEAT).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os resultados do controle realizado pelo DEC para as duas concentrações de ajuste de nitrato (780 e 1002 mg L⁻¹). A concentração inicial média da solução, determinada pelo método padrão (espectrofotometria), para todos os ensaios procedidos foi de 524 mg L⁻¹. A variação observada pode ter sido causada pela variação temporal da qualidade da água (RIBEIRO et al., 2005), por erros envolvidos no processo de preparação da solução, ou por erros do método. Contudo, a mesma foi considerada de efeito irrelevante no teste das lógicas de

controle. No caso das calibrações realizadas, em todos os ensaios obteve-se um coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,998, sendo todas equações validadas em planilha eletrônica.

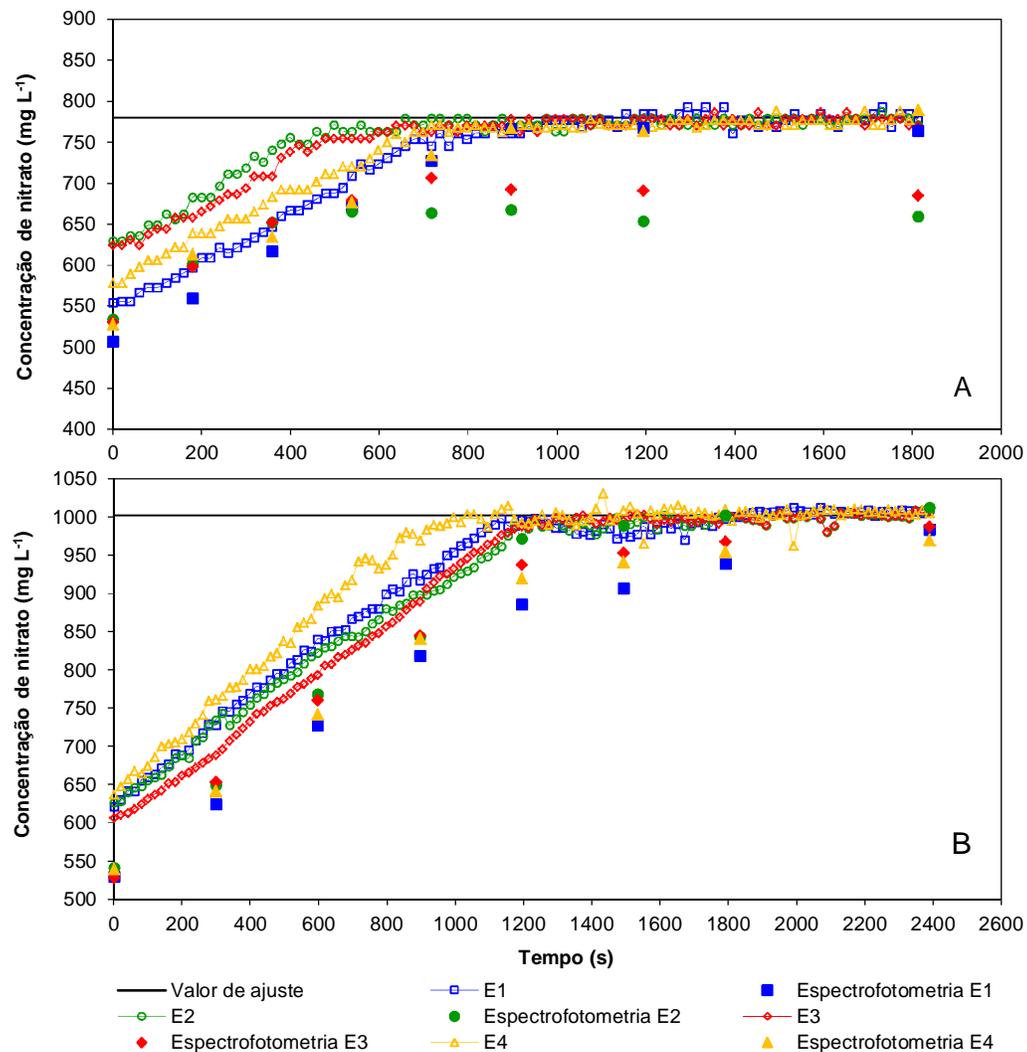


FIGURA 2. Ajuste da concentração de nitrato em solução nutritiva realizados pelo DEC para diferentes concentração finais: (A) 780 mg L^{-1} ; (B) 1002 mg L^{-1} .

Avaliando-se o ajuste para a concentração de 780 mg L^{-1} (Figura 2A) observam-se dois grupos de ensaios: o primeiro formado por repetições que executaram-se o ajuste de modo inadequado (E2 e E3), e o segundo por repetições que o realizaram com exatidão (E1 e E4). Os ensaios E2 e E3 apresentaram leituras incorretas da concentração da solução quando comparado com a concentração observada pelo método padrão. Observa-se nesses ensaios um erro permanente ao longo de todo o ensaio, tendo um valor médio de 89 mg L^{-1} . Diante desse fato, supôs-se que a presença de íons interferentes poderiam estar provocando tal situação, assim foram coletadas amostras da água que estava sendo utilizada para preparação da solução inicial. Os resultados da análise química da água utilizada nos ensaios E2 e E3 indicaram a presença de $91,3 \text{ mg L}^{-1}$ de cloreto, evidenciando a presença desse interferentes próximo ao limite de segurança (100 mg L^{-1}).

Em compensação, observa-se que os desvios médios, dos oito tempos de coleta, entre o valor medido pelo sensor e o padrão, nos ensaios E1 e E4, foram de $25,58$ e $26,63 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente (resultados não apresentados). Esse valor corresponde a cerca de 6 mg L^{-1} de nitrogênio (N), sendo considerado permissível para aplicação que se destina. Essa conversão possibilita avaliar os desvios conforme são recomendadas as soluções nutritivas aplicadas na

agricultura. Já para E2 e E3, consideradas inadequadas, os desvios médios observados foram de 102,39 e 75,16 mg L⁻¹.

No caso do ajuste para a concentração de 1002 mg L⁻¹ (Figura 2B) constata-se que os ensaios E2 e E3 possibilitaram um desvio entre o medido e o padrão de 40 mg L⁻¹ (9 mg L⁻¹ de N), enquanto que nos demais ensaios esse desvio foi equivalente ao dobro desse valor. O aumento observado no valor dos desvios se deve a calibração em intervalos maiores entre as concentrações padrão (200 mg L⁻¹), quando comparada com o intervalo utilizado no primeiro controle avaliado (100 mg L⁻¹).

Ao se observar na Figura 2 os desvios entre o valor medido pelo eletrodo e pelo método padrão, em todos os ensaios, percebe-se uma similaridade: os desvios reduzem à medida que a concentração de nitrato se aproximava do valor de ajuste. Essa diminuição pode ser justificada pela metodologia adotada para calibração do eletrodo, que alocava o valor correspondente a concentração de ajuste em um dos pontos centrais da faixa de calibração. Desse modo, reduziram-se os erros relativos à leitura de concentrações que estivessem próximos a pontos extremos de calibração.

Em relação ao desempenho do DEC no ajuste da concentração da solução para o valor desejando, os valores dos índices utilizados são apresentados na Tabela 2 para os quatro ensaios realizados.

TABELA 2. Índices de desempenho avaliados para a resposta do controlador para as diferentes concentrações de ajuste. **Indexes of performance reviews for the controller response to different concentrations of adjustment.**

Concentração de ajuste (mg L ⁻¹)	Repetição	t _A (s)	t ₀ (s)	t _S (s)	Critérios*		
					IEA (x10 ³)	IEQ (x10 ³)	IEAT (x10 ³)
780	E1	637	975	558	4,42	667,79	1103,86
	E2	358	497	339	1,83	184,54	276,72
	E3	398	637	378	2,26	236,30	414,78
	E4	598	717	558	3,44	436,96	821,62
1002	E1	975	1135	916	10,38	2453,59	4132,70
	E2	1057	1235	956	11,14	2663,87	4542,32
	E3	1035	1234	896	12,01	3176,42	4760,77
	E4	816	995	757	8,44	1923,78	2990,63

t_A-tempo de assentamento; t₀-tempo de duplicação; t_S-tempo de subida; IEA - integral do erro absoluto; IEQ - integral do erro quadrático; IEAT - integral do erro absoluto ponderado no tempo.

Considerando-se os ensaios que apresentam os menores desvios entre o valor medido pelo eletrodo e determinado pelo método padrão verificou-se que para a concentração de ajuste de 780 e 1002 mg L⁻¹, a lógica de controle promoveu o assentamento do sinal de resposta na faixa de ± 5% do valor de ajuste (t_A) médio em 618 e 1046 s, respectivamente. Os primeiros erros nulos (t₀) médio foram obtidos em 846 e 1235 s; e os tempos de subida (t_S) médio foram alcançados em de 558 e 926 s, respectivamente. Com relação aos índices integrativos (IEA, IEQ e IEAT), notou-se que os ensaios considerados apresentaram valores superiores aos demais ensaios dentro de um mesmo valor de concentração de ajuste. Tal efeito pode ser explicado pelo fato desses ensaios terem requerido um maior tempo para atingir a estabilização e, conseqüentemente, maior erro acumulado.

Assim como no sistema de controle do pH proposto por Pinto et al. (2011) pode-se concluir que o ajuste da concentração instantânea para a de ajuste foi intimamente relacionada com a constituição física do DEC do que com a lógica de controle, pois dependia das informações da realimentação. Além disso, como a injeção foi realizada no reservatório, necessitando um tempo para a mistura entre as soluções, houve um atraso na detecção da mudança da concentração na solução. Entretanto, essa defasagem foi necessária para que se obtivesse a leitura de uma solução mais homogênea possível.

Diante dos dados obtidos nos ensaios de avaliação do sistema de automação torna-se prudente indicar que para maiores de concentração de ajuste, deve-se ampliar o número de padrões utilizados

na calibração do ISE. Assim, os intervalos entre as concentrações padrão serão menores e, conseqüentemente, reduzem-se a possibilidade de ajustes incorretos. Todavia, essa alteração pode acarretar maior complexidade na utilização do eletrodo por parte dos produtores, contribuindo negativamente para a sua adoção.

CONCLUSÕES

De modo geral, constatou-se que o dispositivo desenvolvido se mostrou eficiente para ajustar a concentração da solução para os diferentes valores finais de concentração avaliados. Primeiramente, o mesmo executou a injeção de solução concentrada nos momentos oportunos e, em um segundo momento, conseguiu manter a concentração dentro do limite estabelecido e com um sinal de resposta estável, ajustando a concentração em cerca de 12 e 22 minutos, respectivamente, após o início dos testes.

O dispositivo desenvolvido pode ser utilizado como uma ferramenta de ajuste e controle da concentração de soluções, podendo ser empregado a outros tipos de sensores íon-seletivo, como também para outros elementos químicos. Existe potencial de aplicação do mesmo a cultivos, pois apresenta funcionalidades técnicas aliadas à praticidade, podendo ser uma solução interessante, desde que se utilize um sensor adequado.

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.; PIZZILOLO, 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.
- BAILEY, B.J.; HAGGETT, B.G.D.; HUNTER, A.; ALBERY, W.J.; SVANBERG, L.R. Monitoring nutrient film solutions using ion-selective electrodes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.40, p.129-142, 1988.
- BAMSEY, M.; BERINSTAIN, A.; DIXON, M. Development of a potassium-selective optode for hydroponic nutrient solution monitoring. *Analytica Chimica Acta*, Amsterdam, v.737, p.72-82, 2012.
- BLAIR, L.M.; TAYLOR, G.J. Maintaining exponential growth, solution conductivity, and solution pH in low-ionic-strength solution culture using a computer-controlled nutrient delivery system. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v.55, n.402, p.1557-1567, 2004.
- DARTER, M.; VALERA, A.; NIETO, E.; COLILLA, M.; FERNÁNDEZ, C.J.; ROMERO-ARANDA, R.; CUARTERO, J.; RUIZ-HITZKY, E. Multisensor device based on Case-Based Reasoning (CBR) for monitoring nutrient solutions in fertigation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Lausanne, v.135, p.530-536, 2009.
- DOMINGUES, D.S.; TAKAHASHI, H.W.; CAMARA, C.A.P.; NIXDORF, S.L. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, New York, v.84, p.53-61, 2012.
- 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.

GIELING, T.H.; VAN STRATEN, G.; JANSSEN, H.J.J.; WOUTERS, H. Ise and Chemfet sensors in greenhouse cultivation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Lausanne, v.105, p. 74-80, 2005.

GUTIÉRREZ, M.; ALEGRET, S.; CÁCERES, R.; CASADESÚS, J.; MARFÀ, O.; DEL VALLE, M. Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture*, New York, v.57, p.12-22, 2007.

HELBEL JUNIOR, C.; REZENDE, R.; FREITAS, P.S.L.DE; GONÇALVES, A.C.A.; FRIZZONE, J.A. Effect of electric conductivity, ionic concentration and flow of nutrient solutions in the production of hidroponic lettuce. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.32, n.4, p.1142-1147, 2008.

KIM, H.J.; KIM, W.K.; ROH, M.Y.; KANG, C.I.; PARK, J.M.; SUDDTH, K.A. Automated sensing of hydroponic macronutrients using a computer-controlled system with an array of ion-selective electrodes. *Computers and Electronics in Agriculture*, New York, v.93, p.46-54, 2013.

KOBAYASHI, F.; SUGIURA, M.; IKEURA, H.; SATO, K.; ODAKE, S.; HAYATA, Y. Inactivation of *Fusarium oxysporum f. sp. melonis* and *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* in hydroponic nutrient solution by low-pressure carbon dioxide microbubbles. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v.164, p.596-601, 2013.

LEMONS, 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.

MARTINEZ, H.E.P. *Manual prático de hidroponia*. 1.ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2006. 271p.

PINTO, M.F.; CAMARGO, A.P.; ALMEIDA, A.C.S.; ALVES, D.G.; BOTREL, T.A. Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para microirrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.15, n.2, p.211-217, 2011.

PÔRTO, M.L.A.; ALVES, J.C.; SOUZA, A.P.DE; ARAÚJO, R.C; ARRUDA, J.A.; TOMPSON JÚNIOR, U.A. Doses de nitrogênio no acúmulo de nitrato e na produção da alface em hidroponia. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.30, n.3, p.539-543, 2012.

RIBEIRO, T. A. P.; AIROLDI, R. P. da S.; PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M. da. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.9, n. 3, p. 295-301, 2005.

ROMERO, R.; MURIEL, J.L.; GARCÍA, I.; MUÑOZ DE LA PEÑA, D. Research on automatic irrigation control: state of the art and recent results. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.114, p.59-66, 2012.

SALVADOR, C.A. *Desenvolvimento e avaliação de um sistema de controle de nitrato em soluções nutritivas*. Piracicaba, 2014. 104p. Tese de Doutorado.

STEIDLE NETO, A.J.; ZOLNIER, S.; LOPES, D.C. Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. *Computers and Electronics in Agriculture*, New York, v.103, p.17-25, 2014.

YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHAFF, B.E.; KIM, J.J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.62, p.1108-1115, 1998.