

DESEMPENHO DE LÓGICAS DE CONTROLE PARA O AJUSTE AUTOMÁTICO DO pH DA ÁGUA UTILIZADA EM MICROIRRIGAÇÃO

MARINALDO FERREIRA PINTO¹, CONAN AYADE SALVADOR¹, ANTONIO PIRES DE CAMARGO¹, DINARA GRASIELA ALVES¹, TARLEI ARRIEL BOTREL¹

¹ Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11, 13.418-310, Piracicaba/SP, e-mails: marinaldopinto@usp.br; conan@usp.br; apcpires@usp.br; dinara@usp.br; tabotrel@usp.br

1 RESUMO

Os problemas provenientes da obstrução de emissores têm se constituído como uma das principais limitações à implantação de sistemas de microirrigação, principalmente quando se trata de gotejamento. Quando a causa da obstrução é oriunda de características químicas da água de irrigação, tem-se como alternativa o tratamento da água por meio da correção do pH, pois este determina as condições para a precipitação de íons e conseqüentemente para a obstrução dos emissores. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficácia de três lógicas de controle com realimentação, aplicadas ao ajuste automatizado do pH da água de irrigação. Realizou-se a sintonização e avaliação do desempenho das lógicas de controle proporcional integrativa (PI), proporcional integrativa “modificada” (PIM) e proporcional integrativa derivativa (PID) no ajuste do pH, por meio da injeção de ácido. Os resultados demonstraram que as lógicas testadas foram eficientes no ajuste do pH, sendo que os tempos de assentamento foram de 19,0 (PID), 20,0 (PI) e 68,5 s (PIM). O índice integral do erro absoluto ponderado pelo tempo, que indica a magnitude das oscilações durante o controle do processo, apresentou valores de 188,7 (PID), 239,4 (PI) e 3083,3 (PIM), indicando maior instabilidade na lógica de controle PIM.

Palavras-chave: obstrução de emissores, instrumentação, automação, controlador de pH.

PINTO, M. F.; SALVADOR, C. A.; CAMARGO, A. P.; ALVES, D. G.; BOTREL, T. A.
PERFORMANCE OF FEEDBACK CONTROL LOGIC FOR AUTOMATED
ADJUSTMENT OF WATER pH USED IN MICROIRRIGATION

2 ABSTRACT

Clogging problems in emitters have been the major limitations for adoption of microirrigation systems, mainly drip irrigation. When clogging is caused by chemical agents, the treatment intended for pH adjustment constitutes a feasible solution, as it determines the conditions for ion precipitation, and therefore emitters clogging. The aim of this study was to evaluate the efficiency of three feedback control logic systems for automated adjustment of water pH in microirrigation systems. The following control logic was tuned and evaluated for water pH adjustment using a control system coupled with an acid injection device: proportional integral controller (PI), modified proportional integral derivative (MPID), proportional integral derivative (PID). These control logic systems were efficient for adjusting water pH. Settling times of PID, PI and MPID controllers were 19.0, 20.0 and

68.5s, respectively. The Integral Time Absolute Error (ITAE) was 188.7 (PID), 239.4 (PI) and 3083.3 MPID, which shows that MPID controller had the highest instability for water pH control.

Keywords: emitter clogging, instrumentation, automation, pH controller.

3 INTRODUÇÃO

A obstrução de emissores e tubulações constitui um dos problemas mais importantes na operação e manutenção de sistemas de microirrigação e está diretamente associada à qualidade da água (Povoa & Hills, 1994), uma vez que os emissores são bastante susceptíveis a obstrução. O entupimento de emissores em linhas laterais provoca redução da uniformidade de emissão (Souza et al., 2006), sendo que a obstrução total de 5 a 10% dos emissores proporciona coeficiente de variação de vazão de 23 a 33% (Frizzone et al., 2012).

Problemas de entupimento são provocados pela ação isolada ou conjunta de agentes de natureza química, física ou biológica (Talozi & Hills, 2001). O controle do pH da água constitui uma das técnicas mais empregadas e eficazes para o tratamento da água a fim de minimizar problemas de obstrução de origem química (Lamn et al., 2007; Pitts et al., 2003; Ayers & Westcot, 1999), sendo que em níveis de pH abaixo de 7 também é reduzida a proliferação de microorganismos e a formação de biofilme na tubulação e nos emissores (Cararo et al., 2006).

O processo relacionado ao controle do pH da água é bastante complexo, visto que o pH depende de fatores como potencial redox, temperatura, pressão e concentração relativa de íons (Pitts et al., 2003), sendo que a qualidade da água pode sofrer alterações temporais (Ribeiro et al., 2005a; 2005b; 2005c). Em sistemas de irrigação a vazão requerida pode variar ao longo dos eventos de irrigação, demandando o uso de ferramentas de controle inteligente capazes de detectar as oscilações na qualidade da água e na vazão do sistema de irrigação.

Os controladores proporcional integrativo derivativo (PID) são amplamente utilizados no controle de processos industriais (O'Dwyer, 2009; Zhuang & Atherton, 1993). Devido a versatilidade intrínseca a estes controladores, existe o potencial de aplicá-los no controle de processos associados à irrigação. Acerca disto, Pinto et al. (2011) desenvolveram um controlador para o ajuste do pH da água de irrigação, cuja lógica de controle baseou-se em controladores proporcional integrativo com auto ajuste dos parâmetros (PIM).

Os controladores PID agem com base no erro entre o valor atual de uma variável de controle e o valor de referência, também denominado de *set-point* (ponto de ajuste) (Leite et al., 2010). A saída do controlador é caracterizada pelos componentes proporcional, integrativo e derivativo, cujos parâmetros são: constante de proporcionalidade (K), tempo integrativo (T_i) e tempo derivativo (T_d). Estes parâmetros necessitam ser ajustados por um processo chamado de sintonização, o qual pode ser realizado de diferentes maneiras, como: ICM-PID, Cohen-Coon, Ziegler-Nichols, IAE ou IEAT (Ho et al., 1995).

Dentre os indicadores de desempenho utilizados para avaliar a qualidade da resposta dos controladores PID, os principais são: o período de oscilação; o tempo de decaimento; o máximo desvio absoluto; e, os índices integrativos (Integral do erro - IE, Integral do erro absoluto - IAE, integral do erro absoluto ponderado pelo tempo - IEAT, e integral do erro quadrático - ISE) (Faccin, 2004; Shinskey, 1994).

Diante do que foi exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de três metodologias de controle inteligente no controle do pH da água de

irrigação. Foram avaliados os controladores proporcional integrativo (PI), proporcional integrativo derivativo (PID) e o proporcional integrativo “modificado” (PIM).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Generalidades

Avaliou-se o desempenho dos controladores PI, PID e PIM, no ajuste do pH da água de irrigação utilizando um sistema de controle caracterizado por um circuito eletrônico microprocessado responsável por executar as leituras do sensor de pH, processar as informações por meio da lógica de controle e intervir no processo acionando atuadores. O circuito eletrônico desenvolvido utiliza um microcontrolador PIC18F4550, amplificadores e outros componentes eletrônicos passivos responsáveis pela amplificação e condicionamento de sinal, e ainda, uma interface de potência utilizando relê para acionamento de uma válvula solenóide. Detalhes construtivos deste circuito eletrônico são descritos por Pinto et al. (2011). Para a medição do pH da água, utilizou-se um sensor potenciométrico Digimed, MDE-CV2, 0 a 14. Na temperatura de 25°C, este sensor gera uma diferença de potencial de 59,16 mV para cada unidade de variação no pH da solução, sendo este sinal elétrico transmitido para o circuito de amplificação e condicionamento de sinal, e logo após, para o conversor analógico-digital do microcontrolador (resolução 10 bits), o que permitiu uma resolução de 0,1% na determinação de pH.

O mecanismo de ação foi composto por uma válvula solenóide Emicol, EVA 02, cujo corpo é de material plástico, utilizada para a injeção de ácido na tubulação e consequente alteração do pH da água em fluxo. Os detalhes construtivos do sistema utilizado para realização do experimento podem ser visualizados na Figura 1.

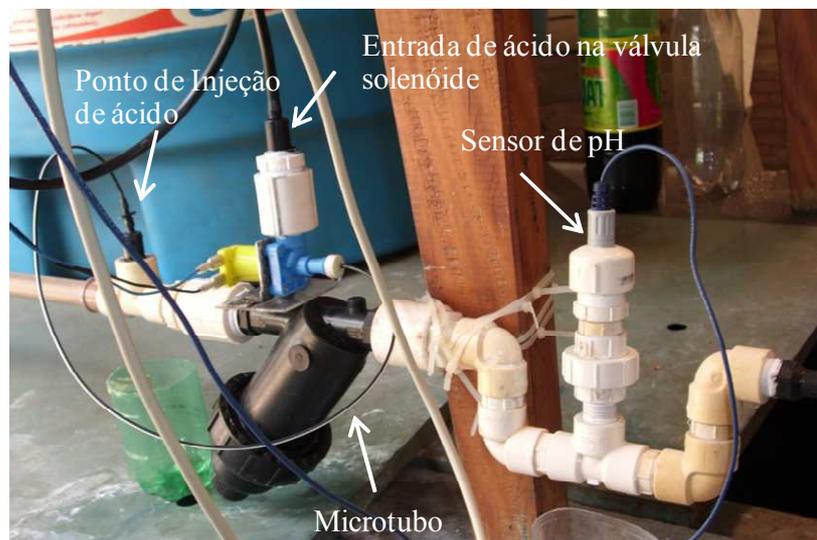


Figura 1. Sistema de controle do pH da água usado para avaliação dos controladores

4.2 Fundamentação matemática

A implementação dos controladores teve como base conceitual, os controladores: proporcional (Equação 1), proporcional integrativo (Equação 2) e proporcional integrativo derivativo (Equação 3).

$$SP_k = K_p e_k \quad (1)$$

$$SI_k = \frac{1}{T_i} \int_0^t e_k dt \quad (2)$$

$$SD_k = T_d \frac{de_k}{dt} \quad (3)$$

em que:

K_p : constante de proporcionalidade;

e_k : erro do controlador no instante em que se efetua a leitura (entrada) k ;

SP_k : ação proporcional correspondente à entrada no instante k , s;

T_i : constante de integração, s;

t : tempo de controle, s;

SI_k : ação integral correspondente à entrada no instante k , s;

T_d : constante de derivação, s; e,

SD_k : ação derivativa correspondente à entrada no instante k , s.

As constantes K_p , T_i e T_d são parâmetros de ajuste, determinadas experimentalmente por meio da sintonização do controlador, conforme está descrito com mais detalhes a seguir. As variáveis SP_k , SI_k e SD_k são as saídas do controlador, que neste caso é o tempo de abertura da válvula de injeção de ácido, relativo a cada modo de controle (proporcional, integrativo e derivativo). Já o erro e_k representa a diferença entre o valor desejado e o medido.

Aplicando o método dos trapézios para solução da integral da Equação 2, considerando um instante k qualquer e que as leituras são feitas em intervalos constantes de tempo igual a I , tem-se:

$$SI_k = \frac{I}{2T_i} (e_1 + 2e_2 + 2e_3 + \dots + 2e_{k-1} + e_k) \quad (4)$$

$$SI_{k-1} = \frac{I}{2T_i} (e_1 + 2e_2 + 2e_3 + \dots + 2e_{k-2} + e_{k-1}) \quad (5)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 4:

$$SI_k = SI_{k-1} + \frac{I}{2T_i} (e_{k-1} + e_k) \quad (6)$$

Para a ação derivativa, considerou-se que a diferencial do erro em relação ao tempo ($\frac{de_k}{dt}$) é expressa pelo quociente entre variação do erro e o intervalo de tempo entre duas leituras consecutivas da entrada do controlador. Desse modo:

$$\frac{de_k}{dt} = \frac{e_k - e_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} = \frac{e_k - e_{k-1}}{I} \quad (7)$$

Aplicando a Equação 7 na Equação 3:

$$SD_k = T_d \left(\frac{e_k - e_{k-1}}{I} \right) \quad (8)$$

A saída do controlador PI é descrita pela Equação 9, sendo um resultado conjunto das ações proporcional e integrativa.

$$SPI_k = K_p(e_k + SI_k) \quad (9)$$

em que:

SPI_k : saída do controlador PI em um instante k qualquer.

Aplicando a Equação 6 na Equação 9, tem-se:

$$SPI_k = K_p \left(e_k + SI_{k-1} + \frac{I}{2T_i} (e_{k-1} + e_k) \right) \quad (10)$$

Em um instante $(k - 1)$, tem-se da Equação 9, que:

$$SI_{k-1} = \frac{SPI_{k-1}}{K_p} - e_{k-1} \quad (11)$$

Substituindo a Equação 11 na Equação 10, tem-se a saída do controlador PI usado para a implementação digital (Equação 12).

$$SPI_k = K_p \left[e_k \left(\frac{I + 2T_i}{2T_i} \right) + e_{k-1} \left(\frac{I - 2T_i}{2T_i} \right) \right] \quad (12)$$

Para o controlador PID, tem-se ainda a ação derivativa, como pode ser visto na Equação 13.

$$SPID_k = K_p(e_k + SI_k + SD_k) \quad (13)$$

em que:

$SPID_k$: saída do controlador PID em um instante k qualquer.

Aplicando as Equação 6 e Equação 8 na Equação 13, resulta na Equação 14.

$$SPID_k = K_p \left[e_k + SI_{k-1} + \frac{I}{2T_i} (e_{k-1} + e_k) + T_d \left(\frac{e_k - e_{k-1}}{I} \right) \right] \quad (14)$$

Considerando a Equação 13 e um instante $(k - 1)$, e ainda, substituindo a ação derivativa pela Equação 8, resulta na Equação 15.

$$SI_{k-1} = \frac{SPID_{k-1}}{K_p} - e_{k-1} - T_d \left(\frac{e_{k-1} - e_{k-2}}{I} \right) \quad (15)$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 14, obtém-se a saída do controlador PID (Equação 16):

$$SPID_k = SPID_{k-1} + K_p \left[e_k \left(1 + T_d + \frac{I}{2T_i} \right) + e_{k-1} \left(\frac{I}{2T_i} - 2T_d - 1 \right) + e_{k-2} T_d \right] \quad (16)$$

A saída do controlador PIM é dada pela Equação 17 (Pinto, 2010). Para esta equação foi necessária a inserção de uma restrição, pois quando o erro entre leituras consecutivas é igual, torna-se possível a execução de uma divisão por zero o que causaria uma falha na rotina do controlador. Baseando-se em resultados de testes preliminares, a restrição adotada foi arbitrar uma constante de proporcionalidade ($k=10$), que substitui o termo que multiplica o erro. Além disso, a válvula de controle de injeção do ácido não possui funcionamento adequado quando acionada por um tempo inferior a 0,1 s, o que exigiu a inclusão de outra restrição na rotina dos controladores avaliados. Sendo assim, o tempo de ação dos controladores foi restrito a faixa de 0,1 a 0,9 s, dentro do intervalo entre leituras de 1 s.

$$SPIM_k = SPIM_{k-1} + \left(\frac{SPIM_{k-1} - SPIM_{k-2}}{e_{k-1} - e_{k-2}} \right) e_k \quad (17)$$

A sintonia dos controladores PI e PID foi feita pelo método de Ziegler-Nichols (Hang et al., 1991). No procedimento de sintonização, realizaram-se ensaios do sistema com o controlador proporcional implementado, sem as ações integrativas e derivativas, sendo testados ganhos de 100, 250, 500, 750 e 1000. A partir desses ensaios se determinou o ganho que propicia uma resposta com oscilação e amplitude constante, caracterizando o ganho crítico (G_u). De posse do ganho crítico foi determinado o período de oscilação (P_u) da variável controlada. As constantes de proporcionalidade (K_p), tempo de integração (T_i) e tempo de derivação (T_d) foram calculadas conforme está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos controladores PI e PID pelo método de ZIEGLER-NICHOLS

Controlador	Parâmetros		
	K_p	T_i	T_d
PI	$G_u/2,2$	$P_u/1,2$	
PID	$G_u/1,7$	$P_u/2,0$	$P_u/8$

Fonte: Adaptado de Hang et al. (1991)

A implementação dos controladores foi feita por meio do software embarcado no microcontrolador, composto por algoritmos específicos para cada modo de controle avaliado. O fluxograma geral do software está apresentado na Figura 2, em que "S" representa a saída do controlador e indica o tempo de abertura da válvula solenóide.

Os controladores PI, PID e PIM foram avaliados para diferentes condições iniciais de pH: PI (9,0; 8,1 e 6,9); PID (8,1; 7,4 e 6,7); e, PIM (9,3; 8,2; 7,5 e 6,2). Em todos os ensaios definiu-se o valor do pH de referência ou desejado igual a 5,5, tendo em vista este valor de pH ser considerado seguro para evitar a obstrução química por precipitação de ferro, manganês, cálcio e magnésio (Pitts et al., 2003). Durante testes preliminares observou-se que o tempo de

assentamento implementando qualquer uma das lógicas de controle era inferior a 1 minuto, e portanto, arbitrou-se um tempo de ensaio mínimo igual a 7 minutos, sob uma vazão de 260 L h⁻¹. O dispositivo de ajuste do pH da água de irrigação estava conectado a uma linha lateral com microtubos.

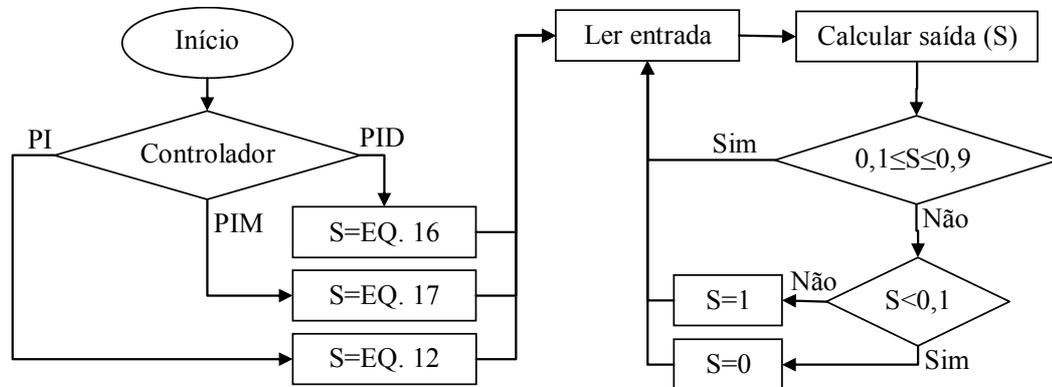


Figura 2. Fluxograma do software utilizado para a implementação dos controladores PI, PID e PIM

Para cada ensaio, determinou-se o desempenho do controlador avaliado mediante os seguintes índices: a) integral do erro absoluto (IEA); b) integral do erro quadrático (IEQ); c) integral do erro absoluto ponderado pelo tempo (IEAT); tempo de assentamento (t_A); tempo de duplicação (t_0); e, tempo de subida (t_S). O índice IEAT indica a magnitude das oscilações do controlador/processo após atingido o tempo de assentamento. O tempo de assentamento (t_A) representa o tempo necessário para que as oscilações na resposta da variável de controle pertençam a uma faixa percentual arbitrária do valor de referência, neste caso de 5%. O tempo de duplicação (t_0) refere-se ao tempo necessário para obtenção do primeiro erro nulo. O tempo de subida (t_S) indica o tempo requerido para que o valor de referência altere-se de 10% até 90% frente a mudança do valor da variável ao longo do processo. Os índices integrativos foram calculados utilizando as equações 18 a 20.

$$IEA = \int |e(t)| dt \quad (18)$$

$$IEQ = \int e(t)^2 dt \quad (19)$$

$$IEAT = \int t|e(t)| dt \quad (20)$$

As integrais foram calculadas numericamente pelo método dos trapézios. Já os demais índices (t_A , t_0 , t_S), foram obtidos analisando-se os dados em planilha eletrônica. Estes índices podem ser visualizados graficamente, por meio da resposta (y_0) de um sistema hipotético como está apresentado na Figura 3.

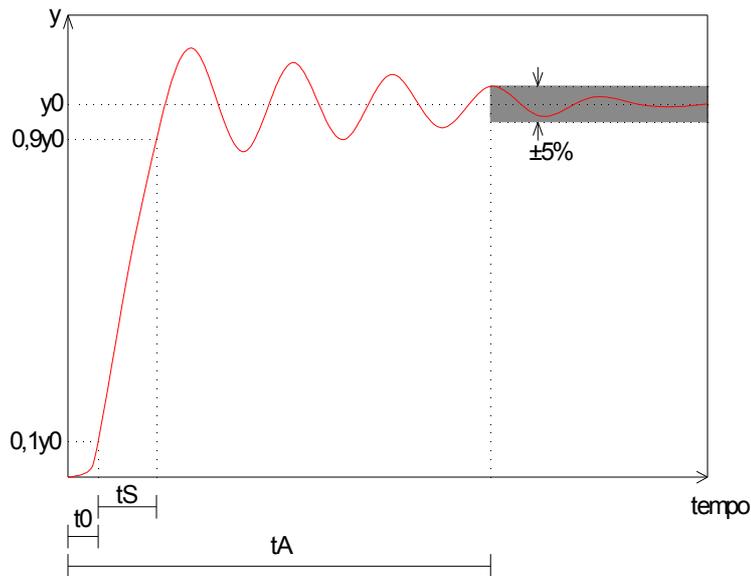


Figura 3. Ilustração do significado dos índices t_0 , t_A e t_s . Fonte: Adaptado de Faccin (2004)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 está apresentada a resposta do controlador com a ação proporcional, sob um ganho de 1000. Pode-se observar que a resposta do controlador possui oscilação quase constante, caracterizada pela amplitude e período. Para o referido ganho, este comportamento caracteriza que o valor crítico (G_u) foi atingido, cujo período de oscilação (P_u) foi de aproximadamente 13,4 s. Aplicando estes valores ao método de Ziegler-Nichols (Tabela 1), tem-se que os parâmetros K_p e T_i do controlador PI foram respectivamente 454,5 e 11,2 s. Já para o controlador PID os parâmetros K_p , T_i e T_d foram respectivamente 588,2; 6,7 e 1,7 s.

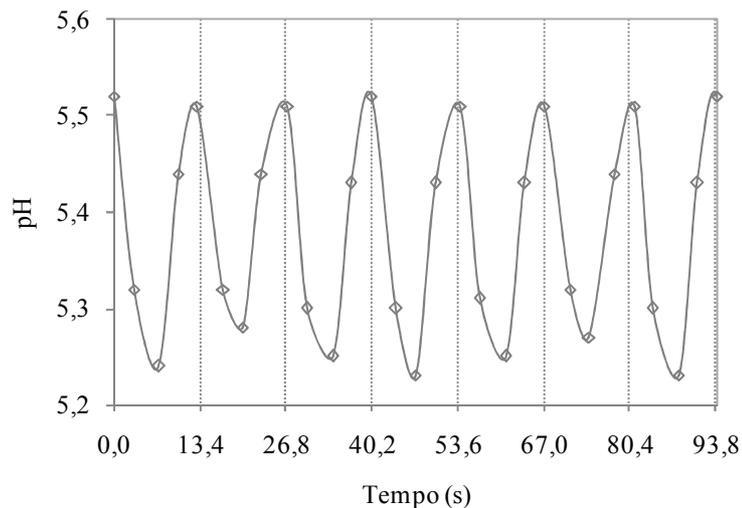


Figura 4. Resposta do controlador com ação proporcional de ganho 1000, usado para sintonização dos controladores PI e PID

As respostas dos controladores PI, PID e PIM podem ser visualizadas nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente. Pode-se perceber graficamente que o controlador PID

apresentou os melhores resultados no que se refere à estabilidade do pH da água, bem como tempo de ajuste do pH para o valor de referência, sendo este tempo de aproximadamente 30 s. Este resultado foi semelhante para os controladores PID e PI, todavia o controlador PI apresentou maior dispersão inicial, fato que não foi observado no controlador PID. Esta diferença é o resultado da ação derivativa que tem a função de atenuar a ação do controlador diante de variações bruscas, de modo que no início do processo quando estas variações são mais intensas, a velocidade de correção do processo aumenta devido a sua atuação de forma antecipatória quando se detecta variação no sinal de erro. Já a ação integrativa apenas age no sentido de reduzir o erro estacionário, comum aos controladores proporcional, e por isso, no instante inicial do processo de ajuste do pH da água o controlador PI apresentou oscilações superiores ao PID (Faccin, 2004).

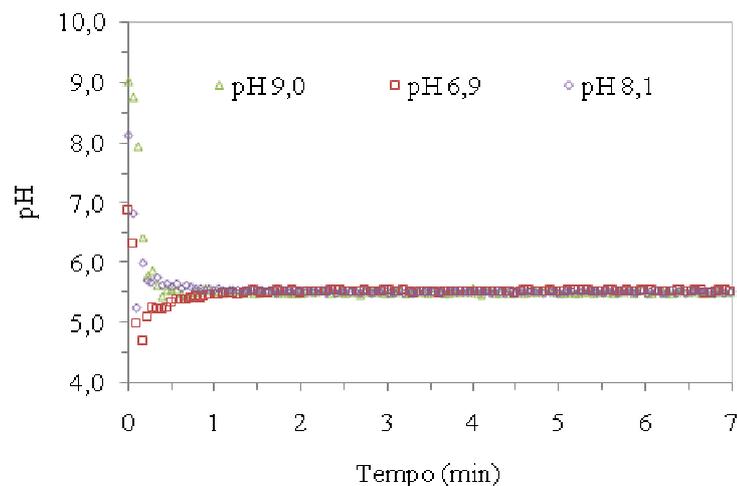


Figura 5. Resposta do controlador PI sob diferentes condições iniciais de pH da água.

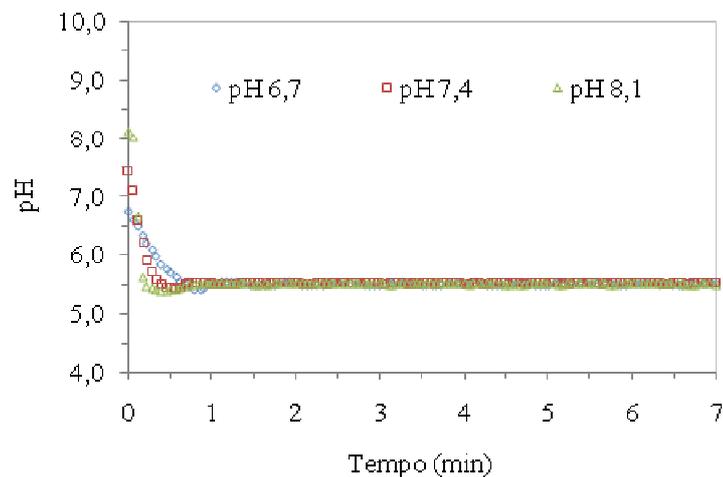


Figura 6. Resposta do controlador PID sob diferentes condições iniciais de pH da água.

O controlador PIM apresentou oscilações e tempo de ajuste superior aos controladores PI e PID, levando em torno de 60 s para atingir o valor de referência, tendo ainda como inconveniente, proporcionar valores de pH muito inferiores ao valor desejado antes de atingir o t_A (Figura 7). Este inconveniente é esperado nos primeiros instantes do processo, pois a "auto-sintonização" ou o ajuste de parâmetros deste controlador ocorre durante a inicialização

do processo. Assim sendo, verifica-se que este modo de controle demanda um tempo inicial para a “auto-sintonização” e durante este intervalo a resposta se torna instável. Após o auto-ajuste, a instabilidade da resposta é reduzida. Entretanto, este controlador apresenta uma grande vantagem em relação aos controladores PI e PID, que é o fato de não necessitar de sintonização.

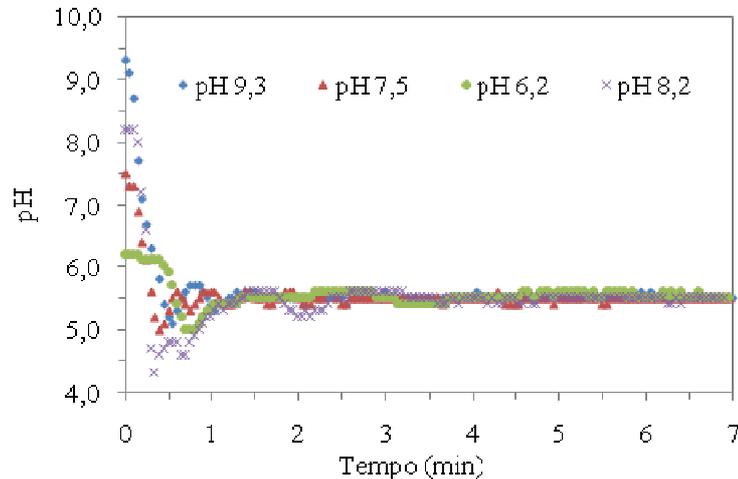


Figura 7. Resposta do controlador PIM para diferentes condições iniciais de pH da água

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios dos índices de desempenho t_0 , t_A , t_S , IEQ, IAE e IEAT. Constata-se que o controlador PIM teve o pior desempenho para os índices apresentados, exceto t_S que foi inferior ao valor obtido pelo controlador PID. Comparando-se o IEAT observa-se que o controlador PI apresentou valor similar ao PID, enquanto que o controlador PIM apresentou um valor de IEAT aproximadamente 16 vezes maior que aquele observado no controlador PID, indicando que a saída do sistema utilizando o controlador PIM continuou a sofrer variações mesmo após atingido o valor desejado. Já o tempo de assentamento dos controladores PIM e PID não foi tão discrepante quanto o resultado do IEAT. O controlador PI possibilitou t_0 e t_S inferiores ao controlador PID, ou seja, o controlador PI atingiu o valor desejado mais rapidamente, levando menos que a metade do tempo do controlador PID. Ao se avaliar o t_A , verifica-se valores semelhantes para os controladores PI e PID (por volta de 20 s). Adicionalmente, o IEQ e o IEA do controlador PIM apresentou valores até 3 vezes superior aos controladores PID e PI, indicando que a justificativa apresentada para os resultados do índice IEAT é adequada. Outro aspecto relevante para fundamentar tal resposta refere-se ao cálculo da IEAT, no qual os erros em um tempo de ensaio maior são penalizados em relação aos erros no início da ação de controle.

Tabela 2. Valores médios dos índices de desempenho avaliados para a resposta dos controladores PIM, PI e PID

CRITÉRIO	PIM	PI	PID
----------	-----	----	-----

t_0 (s)	26,8	9,7	25,7
t_A (s)	68,5	20,0	19,0
t_S (s)	12,8	5,3	14,3
IEQ	72,6	33,0	22,3
IEA	56,0	20,1	18,1
IEAT	3083,3	239,4	188,7

Sendo: t_0 -tempo de duplicação; t_A - tempo de assentamento; t_S - tempo de subida; IEQ- integral do erro quadrático; IEA- tempo integral do erro absoluto; IEAT - integral do erro absoluto ponderado pelo tempo; PIM - controlador proporcional integrativo “modificado”; PI- controlador proporcional integrativo; e, PID - controlador proporcional integrativo derivativo.

Apesar do controlador PID ter apresentado o melhor desempenho, é importante ressaltar que o controle do pH da água de irrigação não necessita de uma exatidão maior que 0,1, uma vez que é recomendado que o pH seja mantido inferior de 7 (PITTS et al., 2003) e superior a 4,5 (KIDDER, et al., 2009). Da mesma forma, não é necessário um tempo de assentamento inferior a 1 minuto, tendo em vista que os eventos de irrigação têm duração superior a 30 minutos, na maioria dos casos. Acerca destes critérios, pode-se afirmar que os controladores avaliados apresentaram desempenho satisfatório para o referido propósito.

6 CONCLUSÕES

O controlador PID apresentou o melhor desempenho no controle do pH da água de irrigação, em todos os critérios de desempenho analisados (t_0 , t_A , t_S , IEQ, IEA, IEAT). Mesmo assim, os demais controladores analisados (PI e PIM) podem ser utilizados para esta finalidade, pois apresentaram resultados satisfatórios para tal aplicação.

O controlador PIM possui maior simplicidade de uso, pois dispensa sintonização, embora propicie oscilação (IEAT) e tempo de assentamento (t_A) superiores aos controladores PI e PID.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de GHEI, H. R.; MEDEIROS, J. F.; DAMASCO, F. A. V. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29, revisado 1).

CARARO, D. C. et al. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 22, n. 2, p. 251-257, 2006.

FACCIN, F. **Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID**. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

FRIZZONE, J. A. et al. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356 p.

HANG, C. C.; ÅSTRÖM, K. J.; HO, W. K. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula. **IEE Proceedings-D**, London, v. 138, n. 2, p. 111-118, Mar. 1991.

HO, W. K.; HANG, C. C.; CAO, L. S. Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications. **Automatica**, Amsterdam, v. 31, n. 3, p. 497-502, Mar. 1995.

KIDDER, G. E.; HANLON, A. **Neutralizing excess bicarbonates from water irrigation**. SL-142. Florida: Agricultural Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, 2009. 12 p.

LAMN, F. R.; AYARS, J.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production: design, operation, and management**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007. 618 p.

LEITE, M. S.; FILETI, A. M. F.; SILVA, F. V. Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e PID convencional em um bioprocesso. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 147-158, mar. 2010.

O'DWYER, A. **Handbook of PI and PID controller tuning rules**. 3. ed. London: Imperial College Press, 2009. 608 p.

PINTO, M. F. **Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para irrigação localizada**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.

PINTO, M. F. et al. Desenvolvimento de um sistema para controle do pH da água para microirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 211-217, 2011.

PITTS, D. J.; HAMAN, D. Z.; SMAJSTRLA, A. G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems**. Florida: University of Florida, 2003. 12 p. (Bulletin, 258).

POVOA, A. F.; HILLS, D. J. Sensitivity of microirrigation system pressure to emitter plugging and lateral line perforations. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 37, n. 3, p. 793-799, May 1994.

RIBEIRO, T. A. P. et al. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p.450-456, jul. 2005a.

RIBEIRO, T. A. P. et al. Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 1-6, jul. 2005b.

RIBEIRO, T. A. P. et al. 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, jul. 2005c.

SHINSKEY, F. G. **Feedback controllers for the process industries**. New York: McGraw-Hill, 1994. 281 p.

SOUZA, J. A. A.; CORDEIRO, E. A.; COSTA, E. L. Aplicação de hipoclorito de sódio para recuperação de gotejadores entupidos em irrigação com água ferruginosa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 5-9, jan. 2006.

TALOZI, S. A.; HILLS, D. J. Simulating emitter clogging in a microirrigation subunit. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, n. 6, p. 1503-1509. Dec. 2001.

ZHUANG, M.; ATHERTON, P. D. Automatic tuning of optimum PID controllers. **IEE Proceedings-D**, London, v. 140, n. 3, p. 216-224, Mai 1993.