

Desarrollo de un Controlador Neuro-Difuso para el control de la Distribución de Agua en un Tramo de un Canal Principal de Riego

Calderón-Mendoza E.*, Rivas-Perez R.***, Sotomayor-Moriano J.*

*Programa de Maestría en Ingeniería de Control y Automatización, Pontificia Universidad Católica del Perú, Avenida Universitaria 1801, San Miguel, Lima, Perú (Tel: 51-1 6262000, Anexo 4716;
(e-mail: edwin.calderon@pucep.pe, jsotom@pucep.edu.pe)

**Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Universidad Politécnica de la Habana, CUJAE, Cuba (e-mail: rivas@electronica.cujae.edu.cu)

Resumen: Se desarrolló un controlador neuro-difuso con predictor de Smith (NDPS) para el control efectivo de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego (planta), con el objeto de mejorar la eficiencia y reducir las actuales pérdidas de agua por concepto de operación en los sistemas de riego. Se obtuvo un modelo matemático con un aceptado grado de adecuación del tramo de canal de riego objeto de estudio. Se diseñó un controlador neuro-difuso, el cual integra conocimiento y auto-aprendizaje y dispone en su estructura interna de un predictor de Smith (PS), para compensar el efecto del retardo de tiempo dominante de la planta. Finalmente, se muestran los resultados experimentales comparativos de funcionamiento del controlador NDPS con otro controlador PI con PS, ambos diseñados bajo las mismas especificaciones de respuesta temporal, con el objetivo de evaluar sus respectivos desempeños frente al efecto de perturbaciones y de variaciones de los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudios. Los resultados obtenidos de estos experimentos muestran una respuesta temporal mucho más rápida, con una mejor atenuación del efecto negativo de las perturbaciones, así como con un grado de robustez superior del controlador NDPS desarrollado.

Palabras claves: Controlador neuro-difuso, predictor de Smith, canal de riego, control de la distribución de agua, modelo matemático, uso eficiente de los recursos hidráulicos.

1. INTRODUCTION

En la actualidad el agua se está convirtiendo en un recurso escaso y en el futuro inmediato la escasez de dicho elemento constituirá uno de los grandes retos que la sociedad moderna deberá enfrentar (Nixon et al., 2004). Es por ello, que en el ámbito internacional se observa un incremento en la aplicación de controladores automáticos en la distribución de agua en los canales principales de riego (Clemmens and Schuurmans, 2004; Litrico and Fromion, 2009). Sin embargo, es necesario señalar que las investigaciones destinadas a lograr una gestión eficiente de los recursos hidráulicos disponibles en los sistemas de riego, no han sido suficientemente impulsadas, debido entre otros factores a las dificultades tecnológicas y de infraestructuras que presentan estos sistemas (Rivas-Perez et al., 2008a).

El aprovechamiento del agua en los sistemas de riego demanda una atención especial debido a que la agricultura es la rama que consume la mayor cantidad de este líquido y probablemente con la menor eficiencia. Por consiguiente, un incremento en la eficiencia de la distribución de agua en los canales principales de riego puede traducirse en volúmenes adicionales de agua para atender mayores áreas de cultivo (Rivas-Perez et al., 2014a). En este sentido, el control automático se muestra como una posible estrategia para mejorar la operatividad de los canales de riego, así como el servicio a los usuarios con tiempos mínimos de respuesta (Litrico and

Fromion, 2009, Rivas-Perez et al., 2014b).

Los controladores PID han sido muy utilizados y expandidos en el control de la distribución de agua en los canales principales de riego (Buyalsky et al., 1991; Clemmens and Schuurmans, 2004; Litrico and Fromion, 2009; Malaterre and Rogers, 1998). Sin embargo, diferentes estudios muestran que los canales principales de riego pueden presentar parámetros dinámicos variables en el tiempo en un amplio rango, por lo que la aplicación de controladores PID convencionales no siempre resulta efectiva (Rivas-Perez et al., 2014b). Por tal motivo, una de las tendencias tecnológicas actuales consiste en el desarrollo de controladores con un mayor grado de robustez, entre los que se destacan los controladores: H_∞ , CPBM, predictor de Smith (PS), PID de orden fraccional, etc. (Linares et al., 2008). Entre las principales desventajas que presentan estos controladores se encuentran: mayor complejidad matemática de los algoritmos de control, necesidad de ajustar parámetros adicionales y/o de disponer de un modelo interno, razonablemente bueno, de la planta a controlar, etc. (Cuenca-Tinitana y Rivas-Perez, 2012).

En los últimos años se vienen aplicando en diferentes ramas de la ciencia y la tecnología, con resultados satisfactorios, los controladores inteligentes, los cuales representan una opción alternativa de solución de problemas de control de plantas caracterizadas por presentar comportamientos dinámicos complejos (Yu, 2009). En muchos casos reales, las plantas indus-

triales son realmente tan complejas que resulta casi imposible o inapropiado controlarlas utilizando controladores convencionales. La caracterización de estas plantas con un entorno de incertidumbre, en general imposible de formular en un riguroso marco matemático, ha conducido al desarrollo de los controladores inteligentes (Santos, 2011).

En este sentido, considerando el complejo comportamiento dinámico que presentan los sistemas de riego (dinámica no lineal y con parámetros distribuidos, retardo de tiempo dominante, parámetros dinámicos variantes en el tiempo, etc.) surge la necesidad de desarrollar controladores inteligentes para el control efectivo de la distribución de agua en canales principales de riego, que se distingan por su robustez, confiabilidad y fácil entendimiento.

Una alternativa de esta clase de controladores consiste en el diseño de controladores neuro-difusos, los cuales se caracterizan por combinar la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales artificiales (RNA) con el poder de interpretación lingüística de los sistemas de inferencia difusos, obteniéndose los siguientes resultados: aplicabilidad de los algoritmos de aprendizaje desarrollados para las RNA; integración de conocimientos implícitos, adquiridos a través del aprendizaje, y explícitos, los cuales pueden ser explicados mediante reglas; extracción de conocimientos para una base de reglas difusas a partir de un conjunto de datos, etc.

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un controlador neuro-difuso con predictor de Smith (NDPS) para el control efectivo de la distribución del agua en un tramo de un canal principal de riego (planta), que posibilite el aumento de la operatividad sobre el canal, así como la disminución de las pérdidas por concepto de operación.

Este trabajo ha sido estructurado de la siguiente forma. En la Sección 2 se presentan las características fundamentales de un tramo de un canal principal de riego. En la Sección 3, mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas, se obtiene un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de dicho tramo. En la sección 4 se realiza el diseño del controlador NDPS. En la sección 5 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control del proceso objeto de estudio con controladores NDPS vs PI. Finalmente, en la última sección se ofrecen las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL CANAL PRINCIPAL DE RIEGO

Un canal principal de riego es un sistema hidráulico abierto, cuyo objetivo fundamental consiste en transportar agua desde una fuente (río, lago, represa, etc.) hasta los usuarios finales (agricultores) (Litrico and Fromion, 2009). Los canales principales se encuentran integrados por varios tramos separados por compuertas, las cuales generalmente se utilizan para controlar el nivel de agua o las descargas (Rivas-Perez et al., 2008a).

El tramo de canal objeto de estudio pertenece al canal Imperial de Aragón (España), el cual forma parte de la confederación Hidrográfica del Ebro y constituye una de las obras hidráulicas más importantes de Europa (Pedregal et al., 2009).

El agua pasa desde el río Ebro al primer tramo del canal a través de una casa de compuertas, la cual posibilita la entrega de un caudal máximo de 30 m³/s (en el origen). El canal tiene 108 km de longitud, una profundidad variable entre 3 m y 4 m y una sección transversal trapezoidal. Además, presenta un total de 10 tramos de diferentes longitudes, separados mediante compuertas sumergibles (Rivas-Perez et al., 2008a).

En la Fig. 1. se muestra un diagrama funcional del canal objeto de estudio, en el cual es posible observar los tramos, las compuertas que regulan las descargas, las entregas laterales de agua, así como los puntos de medición de nivel aguas abajo al final de cada tramo.

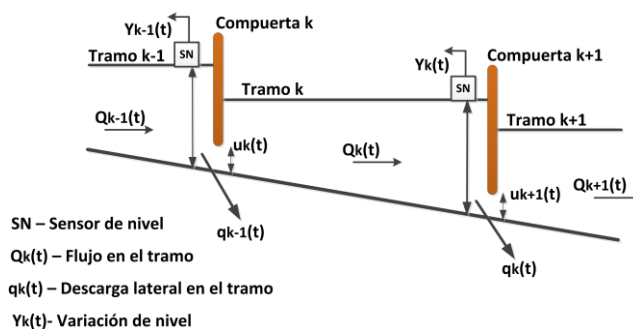


Fig. 1. Diagrama funcional del canal de riego objeto de estudio.

El canal se encuentra electrificado y automatizado de forma íntegra. De la Fig. 1 se observa que el método de regulación utilizado en el canal es el de aguas abajo con sensor alejado. Los controladores instalados en cada tramo para el control de la distribución del agua son del tipo convencional (PI y PID), los cuales como es conocido no garantizan un efectivo control cuando las plantas presentan comportamientos dinámicos complejos (Feliu-Batlle et al., 2011).

3. IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN TRAMO DEL CANAL DE RIEGO

El diseño de controladores generalmente requiere de modelos matemáticos que describan de forma adecuada el comportamiento dinámico como objeto de control de las plantas bajo estudio (Rivas-Perez et al., 2008b).

En el caso de los canales principales de riego, tradicionalmente el modelado matemático se realiza mediante las ecuaciones de Saint-Venant (Chow, 1988). Estas ecuaciones son no lineales en derivadas parciales del tipo hiperbólicas con restricciones complejas, por lo que su utilización directa en el diseño de controladores presenta serias dificultades (Castillo-García et al., 2011).

En los últimos años se vienen aplicando de forma exitosa los métodos de identificación de sistemas para la obtención de modelos matemáticos adecuados de la distribución de agua en los canales principales de riego (Litrico and Fromion, 2009). Los modelos matemáticos que se obtienen mediante estas herramientas se derivan directamente de los datos observados de entrada y salida de la planta y pueden ser utilizados con fines de diseño de controladores efectivos de la distribución de agua (Rivas-Perez et al., 2014a).

En este trabajo se aplican los métodos de la identificación de sistemas para la obtención del modelo matemático del tramo de canal objeto de estudio. Los datos utilizados corresponden al primer tramo (origen) del canal principal Imperial de Aragón, el cual presenta una infraestructura hidráulica compleja. Cuenta con un largo de 8 Km, una profundidad variable entre 3.1 m y 3.6 m, un ancho variable de hasta 30 m y conduce un caudal máximo de 30 m³/s (Rivas-Perez et al., 2008a).

Como resultado del experimento de identificación no paramétrica con señal escalón se obtuvieron los valores aproximados del retardo de tiempo y del orden del modelo de la planta. En base a estos resultados se diseñó una secuencia binaria pseudo-aleatoria (SBPA), con el fin de excitar de forma persistente las compuertas aguas arriba de la planta, posibilitando que

estas alternen entre dos niveles de variación de sus magnitudes de apertura, con el objeto de obtener una significativa, aunque no muy grande, variación del nivel de agua en el tramo del canal (identificación paramétrica). Para ello, cuatro compuertas recibieron un incremento simultáneo en sus magnitudes de apertura de ±50 cm, equivalente a una variación en la magnitud de apertura total de las compuertas de ±200 cm, lo cual se corresponde con el régimen de operación habitual del tramo de canal.

Los datos fueron muestreados con un periodo de muestreo de 15 s. El experimento tuvo una duración de 2:52 h. Los datos adquiridos se muestran en la Fig. 2. Un procedimiento adicional consistió en la división de los datos en datos para la identificación y datos para la validación del modelo.

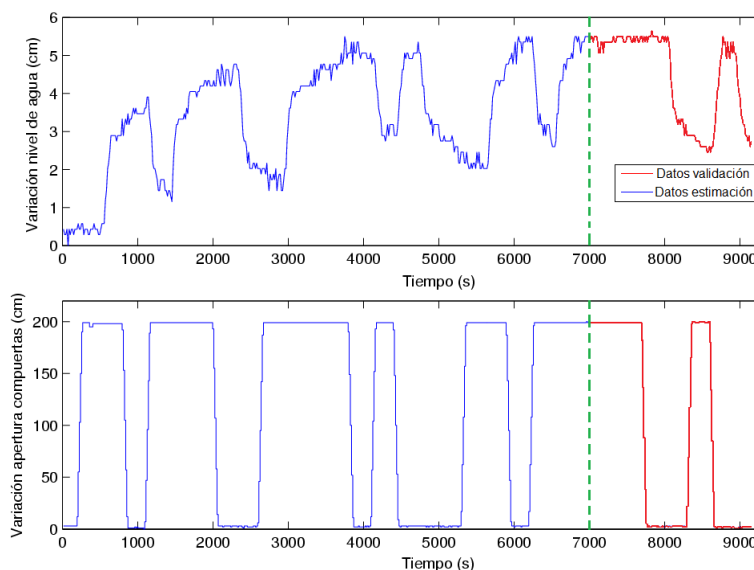


Fig. 2. Registro de datos obtenidos de la planta objeto de estudios con la secuencia binaria pseudo-aleatoria (SBPA).

Se seleccionó una estructura de modelo ARMAX, debido a las ventajas que la misma ofrece para modelar la parte determinística y la parte estocástica del comportamiento dinámico del tramo del canal objeto de estudio. Se desarrolló la estimación de los parámetros de dicha estructura utilizando el método del error de predicción con criterio cuadrático.

Un último paso de la identificación es la validación del modelo obtenido. Para ello se utilizó el método de validación cruzada, el cual consiste en comparar la salida del modelo derivado con los datos que no fueron utilizados en la estimación de parámetros. Como resultado, se obtuvo que el modelo derivado discreto de segundo orden con estructura ARMAX describe el comportamiento dinámico de la planta objeto de estudio con un índice de ajuste (FIT) de 85.27 %. Este FIT del modelo se considera aceptado para fines de diseño de sistemas de control. Los resultados de validación del modelo obtenido se muestran en la Fig. 3.

El modelo derivado de segundo orden discreto, estimado bajo condiciones nominales de operación del tramo de canal objeto de estudio, tiene su equivalente en tiempo continuo, el cual se representa mediante las siguientes expresiones:

$$G_u(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{0.0359}{(47.3s + 1)(1820s + 1)} e^{-330s}, \quad (1)$$

$$G_v(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta v(s)} = \frac{0.1725s^2 + 0.008897s + 5.086 * 10^{-5}}{s^2 + 0.02169s + 1.161 * 10^{-5}}. \quad (2)$$

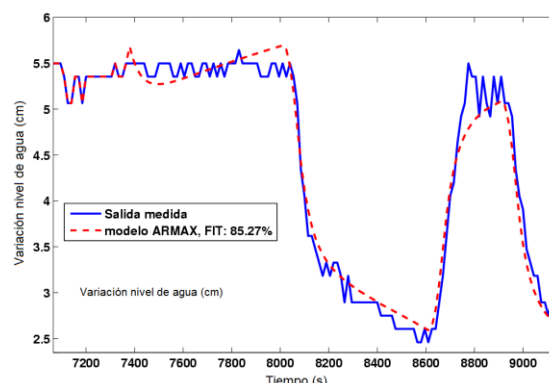


Fig. 3. Resultados de validación del modelo obtenido.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR NEURO-DIFUSO

El enfoque desarrollado en este trabajo consiste en diseñar un controlador que muestre un mejor comportamiento que un controlador PI frente al efecto de perturbaciones medibles y

no medibles. Para ello, nuestra propuesta novedosa consiste en el diseño de un controlador neuro-difuso con predictor de Smith (NDPS). Este controlador híbrido se caracteriza por integrar conocimientos y auto-aprendizaje en una red neuronal. Además, es un controlador en tiempo discreto, cuyo periodo de muestreo ($T_s=0.5$) se seleccionó en base al teorema de estabilidad de Nyquist.

Para el diseño del controlador NDPS se requiere representar el modelo de la planta objeto de estudio (1), (2) en espacio de estado en tiempo discreto. Un método clásico de discretizar el comportamiento dinámico de la planta consiste en utilizar un retenedor de orden cero "ZOH". El modelo en espacio de estado en tiempo discreto de la planta objeto de estudio se representa mediante la expresión:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9997 & 0.0005 \\ -0.0005 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.096 * 10^{-4} \\ 0.1922 * 10^{-4} \end{bmatrix} u(k); \quad (3)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k+1) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

donde $x(k)$ es la variación de nivel de agua aguas abajo alejado, $x(k+1)$ es la velocidad de variación de nivel de agua aguas abajo alejado, $u(k)$ es la variación de apertura de la compuerta equivalente.

Para el diseño del controlador NDPS se definieron 7 funciones de membresía (pertenencia), sobre cada uno de los posibles rangos de variación de las variables del modelo (3), que permiten una rápida y suave variación de la apertura de compuerta aguas arriba. En este sentido, se estableció un rango de variación de nivel de agua aguas abajo alejado de ± 6.5 cm y un rango de la velocidad de variación de nivel de 0.0007 cm/s (sin considerar los efectos de la velocidad de las olas generadas en la superficie libre). Adicionalmente, se consideró un rango de variación de la apertura de la compuerta equivalente aguas arriba de ± 300 cm. Las funciones de membresía indican el grado de pertinencia referido a un valor lingüístico. En la Fig. 4. Se muestran las particiones con la asignación de sus respectivas etiquetas lingüísticas.

Se realizó la construcción de una tabla de base de reglas (ver Tabla 1) para mantener la variación de nivel de agua en un punto de operación deseado, regulando el flujo de agua mediante la apertura o cierre de la compuerta equivalente y asegurando una respuesta lo más rápida posible de la planta con dinámica parsimoniosa.

El controlador NDPS tiene la estructura básica tipo Mamdani, la cual tiene la ventaja de tener altos niveles de interpretabilidad para el análisis de datos para la obtención de un conocimiento estructurado de la planta objeto de estudio (Wi-Meng and Hiok-Chai, 2008). Las funciones de membresía están constituidas por las funciones de activación de cada neurona ubicada en la capa de entrada (sigmoides y gaussianas de tipo 1). El controlador posee dos capas de neuronas y un bloque sumador-normalizador. En la primera capa no se consideró la presencia de bias, en la segunda capa se consideraron 49 neuronas equivalente al número de reglas y el bloque

sumador-normalizador incorpora un factor de ajuste experimental para la mejora del desempeño del controlador. Todos los pesos sinópticos se tomaron igual a la unidad.

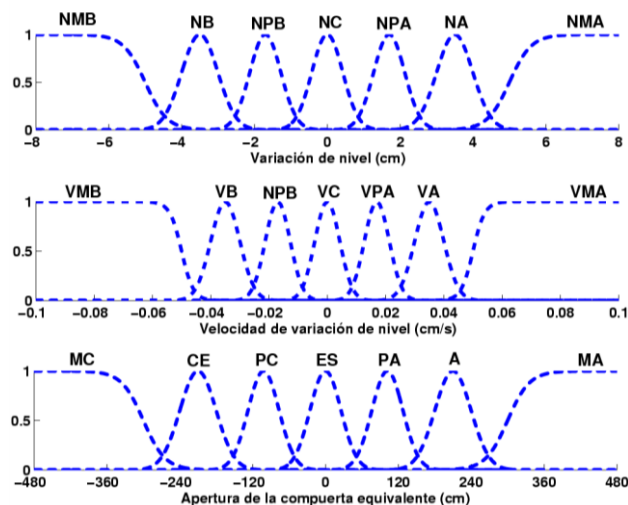


Fig. 4. Asignación de funciones de membresía

Tabla 1. Base de reglas del controlador NDPS.

	NMB	NB	NPB	NC	NPA	NA	NMA
VMB	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VB	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VPB	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VC	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VPA	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VA	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VMA	MA	A	A	ES	CE	CE	MC

donde: MA - muy abierto, A - abierto, ES - en reposo, CE - cerrado y MC - muy cerrado.

Como no se dispone de sensor para la medición de la velocidad de la variación de nivel, se utilizó un filtro de Kalman, el cual posibilita estimar esta variable. Además, esta clase de filtro presenta un buen desempeño, cuando el sistema está sometido al efecto de ruido blanco aditivo (considera parámetros estadísticos de las perturbaciones y del ruido).

En este sentido, la naturaleza aleatoria de las perturbaciones y del ruido, deben ser incorporadas dentro de la ecuación de estimación de estado del observador (Mohan, 1995). La ecuación en espacio de estado en tiempo discreto del filtro de Kalman se representa como:

$$\hat{x}(k+1) = (A-LC)\hat{x}(k) + Bu(k) + Ly(k), \quad (5)$$

donde, L es una matriz de pesos que se determina mediante un proceso de optimización que implica la solución de la ecuación de Riccati. La ecuación (5) puede ser representada en la forma:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \hat{x}(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.002 \\ -0.005 & 0.986 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{x}(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0005 * 10^{-6} \\ 0.2068 * 10^{-6} \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0.0055 \end{bmatrix} y(k). \quad (6)$$

Para compensar el efecto del retardo de tiempo de la planta bajo estudio, a la estructura del controlador diseñado se le incorporó un predictor de Smith (PS), el cual resulta muy efectivo frente a este tipo de comportamiento dinámico.

En la Fig. 5. se muestra el diagrama de bloques del sistema de control de la planta objeto de estudio con el controlador NDPS diseñado. El sistema cuenta con un regulador para la apertura de la compuerta, un filtro de Kalman para la estimación de las variables de estado filtradas de ruido, las cuales se utilizan en los lazos de realimentación del sistema, también se tiene un modelo nominal de la planta para la implementación del PS y un filtro discreto paso bajo de

segundo orden para la atenuación de ruido de alta frecuencia en el lazo de realimentación externo, presente cuando se produce la variación de parámetros dinámicos de la planta.

5. RESULTADOS

Se realizaron diferentes simulaciones del sistema de control de la distribución de agua en el tramo del canal principal de riego objeto de estudio con controladores NDPS y PI con PS, ambos diseñados bajo las mismas especificaciones de respuesta temporal. En las Fig. 6. y Fig. 7. se muestran los resultados comparativos de simulación de las respuestas temporales del sistema de control con ambos controladores.

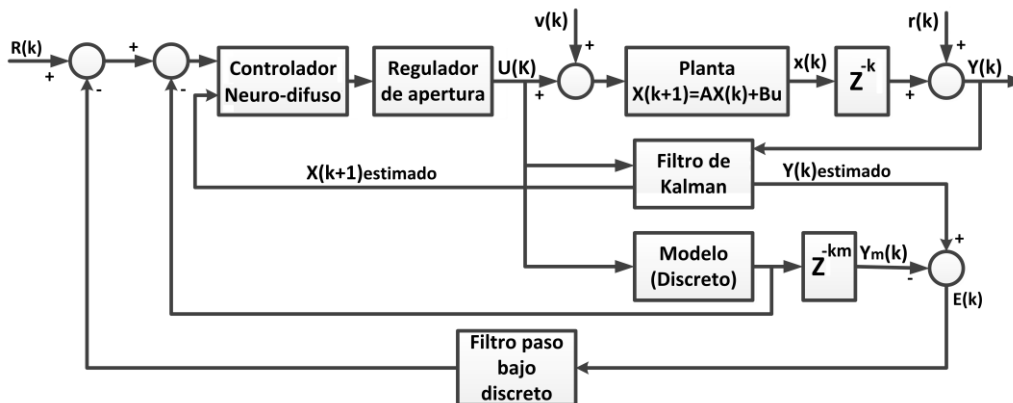


Fig. 5. Diagrama de bloques de sistema de control de la planta objeto de estudio con controlador NDPS.

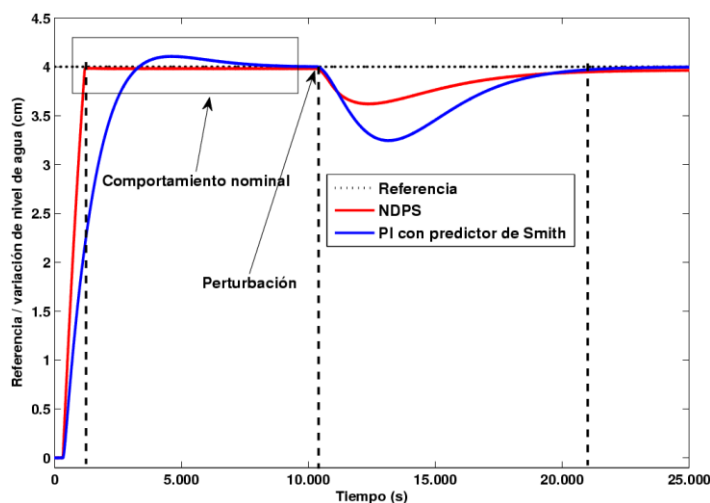


Fig. 6. Respuestas temporales comparativas del sistema de control con controladores NDPS y PI con PS.

De la Fig. 6. se observa que cuando el proceso objeto de estudio se encuentra operando en régimen nominal, las respuestas temporales del sistema de control con ambos controladores difieren. La respuesta con el controlador NDPS no presenta sobreimpulso y es mucho más rápida (tiempo de establecimiento 18% menor respecto a la obtenida con el controlador PI con PS). Adicionalmente, la atenuación de los efectos negativos de las perturbaciones (descargas laterales) presenta un mejor desempeño con el controlador NDPS que con el PI con PS (máximo sobreimpulso negativo 50% menor).

Para evaluar el comportamiento de los controladores bajo el efecto de variaciones de los parámetros dinámicos de la plan-

ta se consideró un rango de variación de +20% de las constantes de tiempo y de la ganancia y de +5% del retardo de tiempo. De esta manera se consigue un comportamiento no lineal característico presente en un tramo de un canal de riego sometido a diferentes regimenes de descarga. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 7. De la figura se observa que la respuesta temporal del sistema de control con el controlador NDPS presenta un menor sobreimpulso (51% menor) y una mejor atenuación del efecto de la perturbación (53%) que la obtenida con el PI con PS.

Estos resultados muestran que el controlador diseñado NDPS exhibe un mejor comportamiento, en el sentido de garantizar

una mayor velocidad de respuesta con una mejor atenuación del efecto de las perturbaciones. Se verificó también la robustez del controlador diseñado dentro de un moderado rango de variación de los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudio, demostrándose un mejor desempeño del controlador NDPS en relación con el PI con PS.

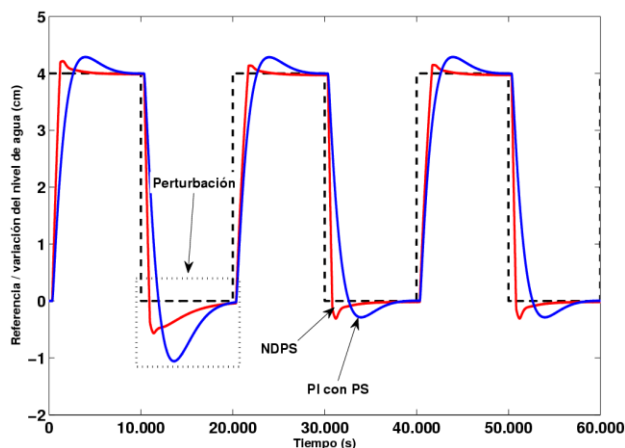


Fig. 7. Resultados comparativos frente a variaciones de los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudio.

6. CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo matemático lineal referenciado a un punto aguas abajo alejado de un tramo de un canal principal de riego, el cual describe de forma adecuada su comportamiento dinámico.

Se desarrolló el diseño de un controlador NDPS para el control efectivo del canal objeto de estudio. Los resultados comparativos de simulación del sistema de control con controladores NDPS y PI con PS mostraron que cuando se aplica el controlador NDPS se obtiene una mejor respuesta temporal tanto en un entorno lineal como en otro no lineal.

Es importante resaltar que en este trabajo se presentan solamente los resultados relacionados con el diseño del controlador NDPS para el control efectivo de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego. Por consiguiente, se requiere en la siguiente etapa de nuestra investigación implementar el controlador en la planta objeto de estudio y verificar el cumplimiento de los resultados obtenidos basados en simulación.

REFERENCIAS

Buyalski, D., Ehler, H., Falvey, H., Rogers, D., and Serfozo E. (1991). *Canal systems automation manual. A water resources technical publication*. Vol. I., Denver, USA.

Castillo-Garcia, F.J., Feliu-Batlle, V., Rivas-Perez, R., and Sanchez-Rodriguez, L. (2011). Time domain tuning of a fractional order PI α controller combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools. In: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 18(PART 1), 15049-15054.

Chow, V.T. (1988). *Open-channels hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, N.Y, USA.

Clemmens, A.J., and Schuurmans, J. (2004). Simple optimal

downstream feedback canal controllers: ASCE test case results. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130 (1), 35-46.

Cuenca-Tinitana, J.C. y Rivas-Perez R. (2012). Desarrollo de un sistema de control predictivo para la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego. *Revista Estudios Universitarios Universidad Nacional de Loja*, 119-130.

Feliu-Batlle, V., Rivas-Perez, R., Castillo-Garcia, F.J., Sanchez-Rodriguez, L., and Linares Saez, A. (2011). Robust fractional order controller for irrigation main canal pools with time-varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 205-217.

Linares, A., Rivas-Perez, R., and Feliu, V. (2008). New advanced management and control strategies applied to hydraulic infrastructures for water transport and distribution. *Abengoa*, No December, 41-42.

Litrico, X. and Fromion, V. (2009). *Modeling and control of hydrosystems*. Springer-Verlag, London, UK.

Malaterre, P.O. and Rogers, D.C. (1998). Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124 (1), 3-10.

Mohan, Reddy, J. (1995). Kalman filtering in the control of irrigation canals. *Appl. Math. Modelling*, 19, 201-209.

Nixon, S., Trent, Z. y Marcuello, C. (2004). *El agua en Europa; una evaluación basada en indicadores*. Agencia Europea de Medio Ambiente, Copenhague.

Pedregal, D.J., Rivas-Perez, R., Feliu V., Sanchez L., and Linares, A. (2009). A non-linear forecasting system for the Ebro River at Zaragoza, Spain. *Environmental Modelling & Software*, 24(4), 502-509.

Rivas-Perez, R., Feliu-Batlle, V., Castillo-Garcia, F.J. and Linares-Saez, A. (2014a). Mathematical model for robust control of an irrigation main canal pool. *Environmental Modelling & Software*, 51(1), 207-220.

Rivas-Perez, R., Feliu-Batlle, V., Castillo-Garcia, F.J., Sanchez-Rodriguez, L. and Linares Saez, A. (2014b). Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal. *Water Technology and Sciences*, 5(1), 23-42.

Rivas-Perez, R., Feliu-Batlle, V., Sanchez Rodriguez, L., Pedregal Tercero, D.J., Linares Saez, A., Aguilar Mariñosa, J.V. and Langarita Garcia, P. (2008a). Identification of the first pool of the Imperial de Aragon main irrigation canal. *Hydraulic Engineering in Mexico*, 23(1), 71-87.

Rivas-Perez, R., Feliu Batlle, V., Castillo Garcia, F., and Linares Saez, A. (2008b). System identification for control of a main irrigation canal pool. In: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(Part 1), 9649-9654.

Santos, M. (2011). Un enfoque aplicado del control inteligente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 8(4), 283-296.

Wi-Meng, T. and Hiok-Chai, Q. (2008). Adaptive training schema in Mamdani-type neuro-fuzzy models for data-analysis in dynamic system forecasting. *International Joint Conference on neural Networks*, 1733-1738.

Yu, W. (2009). *Recent advances in intelligent control systems*. Springer-Verlag, London, UK.