

Prueba de algoritmo de control automático en un canal de laboratorio y un canal simulado

Klaudia Horváth¹, Manuel Gómez Valentín¹, José Rodellar Benedé², Eduard Galvis R.²

1Instituto FLUMEN, 2Departamento de Matemática Aplicada III

Universitat Politècnica de Catalunya

klaudia.horvath@upc.edu

eduard.galvis@upc.edu

1. Introducción

La agricultura es el principal consumidor de agua dulce en el mundo. De acuerdo al World Water Assessment Programme 2009, el riego de cultivos demanda el 70% de todas las reservas de agua dulce (ríos, arroyuelos, acuíferos, lagos, represas), inclusive puede llegar hasta un 90% en los países desarrollados. En promedio solo un 37% del agua demandada por la agricultura se consume efectivamente por los cultivos, mientras que la porción restante se pierde en el sistema debido a varias causas entre ellas la evaporación, estructuras que están deterioradas, fugas y manejo inadecuado en los sistemas de suministro de agua ([1]). Consecuentemente, existe una motivación fundamental por ahorrar agua mediante la mejora de los métodos de irrigación existentes.

El control automático puede reducir de forma significativa las pérdidas de agua que se producen en los sistemas de irrigación y de esta manera contribuir a largo plazo no solamente como una solución ecológica sino también económica. El objetivo de la automatización de canales es obtener un desempeño deseado en el suministro de agua, y para lograr esto se manipulan compuertas en tiempo real utilizando: (1) estructuras basadas en la retroalimentación mediante las variables medidas en campo que informan del estado del canal y (2) la información relacionada con tiempos, periodicidad y duración requeridos por los beneficiarios del canal.

Los canales experimentales de laboratorio pueden ser de utilidad para validar algoritmos de control previo a la implementación en canales reales operativos donde los retardos son considerables y el desarrollo de experimentos es un proceso lento por las mismas distancias que tiene que recorrer el agua, además de los inconvenientes que pueden causar un proceso de experimentación específico. El presente artículo muestra algunas características del canal experimental ubicado en la Universitat Politècnica de Catalunya, además de ilustrar con un ejemplo práctico, la capacidad del canal mediante la implementación de un controlador predictivo, incluyendo la simulación del mismo mediante la herramienta llamada *Simulation of Irrigation Canals* (SIC) ([2]).

2. Canales de laboratorio

Hay pocos canales experimentales alrededor del mundo. Aquí se mencionan algunos de ellos.

En Portugal, el *Centro de Hidráulica y control de canales* que pertenece a la Universidad de Évora, posee un canal en forma de U de una longitud de 141 m. Tiene 4 tramos, cada uno con una longitud aproximada de 40 m ([3]). En Évora, el problema más grande reportado es el offset de los sensores ([4]). De un estudio experimental de un controlador de nivel aguas arriba se concluye que es difícil estudiar experimentalmente el canal de irrigación, debido por ejemplo a la velocidad constante de los servomotores de las compuertas ([3]) dando lugar a errores de posición.

En los EE.UU., un ejemplo es la instalación localizada en el *Bureau of Reclamation's hydraulics laboratory* en Denver. Este canal tiene una longitud de 91.44 m, está hecho con acrílico Plexiglas⁷ y aluminio con sus respectivas compuertas motorizadas, vertederos, caudalímetros y un sifón invertido.

En México, el Instituto Mexicano de Tecnología del agua, IMTA, tiene un canal de laboratorio con cuatro tramos (13, 12, 12 y 13m). La longitud del canal completo es de 50 m, con un ancho de 60 cm y una profundidad de 1m, permitiendo un flujo nominal de 80 l/s ([5]).

En España, un ejemplo de canal experimental es el canal PAC-UPC de la Universitat Politècnica de Catalunya en Barcelona.

2.1 El canal PAC-UPC

El denominado canal PAC-UPC (Canal de Prueba de Algoritmos de Control – Universitat Politècnica de Catalunya) se encuentra en el Campus Nord de la UPC. El canal tiene forma de serpentina (Figura 1), ocupando un área de 22.5m x 5.4m, tiene una profundidad de 1m y un ancho de 0.44m, una longitud de 220m, con un caudal circulante de hasta 150 l/s. El retardo, tiempo en el que el agua viaja desde el depósito (aguas arriba) hasta el final del último tramo (aguas abajo), es un parámetro significativo de los canales y en el caso del PAC-UPC se tiene un retardo 100s con un caudal de 70 l/s, permitiendo así un comportamiento parecido a canales de riego reales.



Figura 1 Canal de Prueba de Algoritmos de Control – Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-PAC)

Este canal tiene 9 sensores de nivel de agua, tres compuertas motorizadas y 4 puntos de extracción de agua (vertederos). Se pueden utilizar configuraciones que van desde una a tres tramos de canal. Esto significa que permite trabajar modelos monovariantes (SISO) hasta configuraciones de múltiples entradas/múltiples salidas (MIMO) como se ve en la Figura 2. En la Figura 2, Q_{w3} , por ejemplo, es el caudal que sale por el vertedero 3 y el caudal Q_{w4} es el caudal aguas abajo en el vertedero 4, que se encuentra en el tramo final.

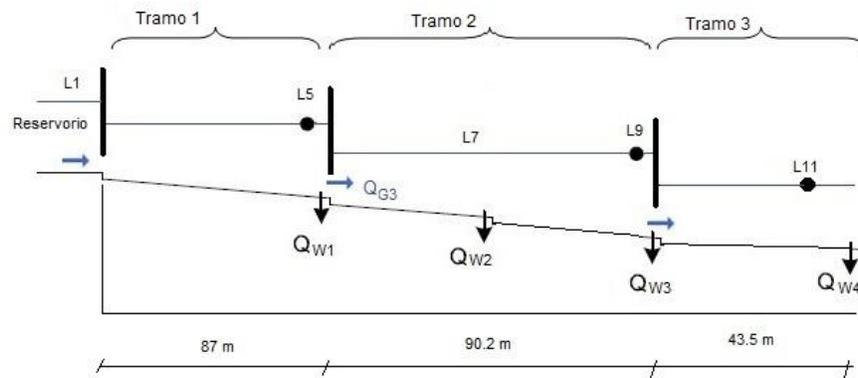


Figura 2 Configuración de tramos en el canal PAC-UPC

La instalación dispone de un cuarto de control con un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA por sus siglas en inglés). El sistema recibe como señales entrada, los niveles de agua de diferentes puntos del canal y también la posición de las compuertas. Las señales de salida permiten cambiar la abertura de las compuertas. Los caudales se miden a partir de relaciones hidráulicas en las compuertas y los vertederos. Los datos se procesan por un SCADA propio desarrollado en el entorno Matlab/Simulink. En este sentido, cualquier nuevo algoritmo de control se puede instalar y probar fácilmente dada la popularidad del programa en ambientes académicos e industriales.

Actualmente, con relación a los errores de cada una de las variables de interés, tenemos que en la medición de nivel de agua se acepta un error absoluto menor a 8 mm, para las aperturas de las compuertas 1, 3 y 5 se aceptan movimientos mínimos de 8, 9.5 y 9mm para propósitos de control, alcanzando de esta manera errores en el rango de ± 3 mm. Con estos valores presentados el error aceptado en el cálculo de caudal es de 6 l/s.

3 Metodología

3.1 Conceptos

3.1.1. Modelado para el control automático

El sistema puede ser modelado por modelos identificados (black box) o con modelos calculados (modelos hidráulicos). De estos últimos existen varios que están basados en la linealización de las ecuaciones de Saint-Venant, o algunos más simplificados como son los modelos de Muskingum, Hayami e Integrador de Retardo Zero (IDZ por sus siglas en inglés).

El modelo de Muskingum, particularmente, es un modelo lineal usado frecuentemente para el tránsito de avenidas ([6]). Este está basado en la ecuación de continuidad y en una ecuación de almacenamiento. El modelo representa una aproximación tosca del comportamiento no lineal del canal. Los parámetros de la ecuación del modelo son K y χ , que contienen toda la información acerca del tramo de canal. K es la constante de tiempo de almacenamiento (con unidades de tiempo) para un tramo de un canal, que puede ser bien aproximado por el tiempo de recorrido de la onda de un extremo a otro del tramo estudiado. χ es un coeficiente adimensional que pondera los efectos relativos del flujo de entrada y el flujo de salida en el almacenamiento del tramo de cauce. χ típicamente varía de 0 a 0.5.

3.1.2. Control predictivo

En automatización industrial, la estrategia de control más utilizada es la de retroalimentación negativa, que calcula la diferencia entre la consigna (valor deseado) y la variable de salida bajo control con el fin de obtener una señal de error utilizada para generar la acción de control. En un intento por mejorar esta estrategia se desarrolló el control óptimo. Entonces, la señal de control se calcula minimizando un índice de rendimiento. La estrategia de control predictivo incluye el control óptimo y calcula la señal de control que hace que la salida predicha del proceso sea igual a la salida deseada del proceso. Como muestra la Figura 3, el modelo predictivo contiene un bloque conductor que genera la trayectoria de salida deseada y un modelo predictivo ([7]).

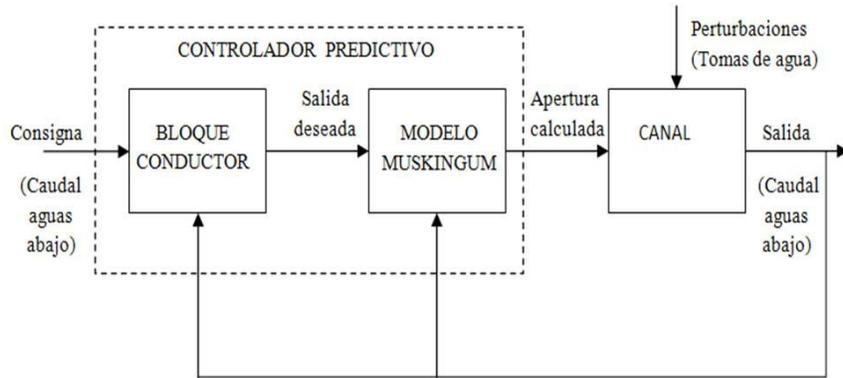


Figura 3 Diagrama en bloques del control predictivo

Hay varios controladores predictivos desarrollados y comprobados numéricamente para canales de riego ([8], [9], [10], [11]). Algunos han sido simulados utilizando el canal de referencia ASCE 1 y de esta manera también se ha comparado su rendimiento con otros tipos de controladores ([12], [13], [14]).

La mayoría de estas pruebas reflejan un rendimiento comparable con el de controladores PIDs, ([15]) reporta un peor rendimiento del controlador predictivo comparado con el controlador PI (Proporcional Integral) debido a la calidad del modelo interno.

Varias pruebas se llevaron a cabo en el canal ASCE1. Los resultados arrojaron que el rendimiento del controlador MPC (Model Predictive Controller) es tan bueno como el obtenido con un controlador PI centralizado ([15]) y también que el rendimiento del controlador predictivo depende completamente del modelo utilizado ([12]).

Otras implementaciones de control predictivo en canales de laboratorio se han presentado en ([16], [17]). También, el control predictivo multivariable se ha probado en canales de laboratorio ([18]). Overloop, por su parte, aplica control predictivo en varios casos prácticos, por ejemplo el control local de canal de irrigación del tramo delta Mendota ([19]) y también implementa control predictivo en el canal West Maricopa ([20]) que es el modelo para el test ASCE1. En síntesis, hay varios estudios teóricos en el campo del control predictivo, pero hay pocos algoritmos comprobados en laboratorios y menos en casos reales.

3.2 Implementación

3.2.1. Implementación del modelo Muskingum

El control predictivo utilizado para este trabajo emplea el modelo de Muskingum. La función de transferencia en tiempo continuo para el dominio de Laplace es la siguiente:

$$G_m = \frac{1 - as}{bs + 1}$$

Los parámetros del modelo de Muskingum se pueden calcular empleando la profundidad de referencia y el caudal de referencia elegido. Este proceso se realizó siguiendo las indicaciones de Cunge ([6]). Como en el modelo Muskingum, la variable de control es el caudal aguas abajo, es necesario combinar este modelo con la ecuación de la compuerta para calcular la apertura para un caudal específico, así como los niveles aguas arriba y abajo de la compuerta. La discretización y la transformación del modelo se describen en ([21]).

Dado que la fórmula no permite calcular la profundidad normal, debido a la pendiente cero, entonces se utilizó una profundidad de referencia, que fue medida en el canal aguas arriba bajo régimen permanente en presencia del caudal de referencia (70 l/s). Los coeficientes calculados son $a=42.38$ $b=44.93$.

3.2.1 Modelado Numérico

El modelo numérico del canal PAC-UPC se ha desarrollado con la ayuda del código SIC, desarrollado por el Cemagref. SIC es un software específicamente desarrollado por canales de riego y por eso tiene todas las características cruciales para trabajar con canales de riego: implementar estructuras como tomas, compuertas y modificar o controlar estos en tiempo real. Este reproduce las principales características del canal y está equipado con la posibilidad de probar algoritmos de control. Así se pueden evaluar las características de cualquier nuevo algoritmo de control. Dado que el SIC también puede trabajar enlazado con Matlab, se pueden realizar análisis numéricos y el mismo archivo del algoritmo de control puede ser empleado tanto para las pruebas de laboratorio como para el cálculo en SIC.

La geometría del canal PAC-UPC ha sido implementada incluyendo el depósito aguas arriba. Está simulado como un tramo ancho de canal con vertedero para simular el rebalse de agua.

Los vertederos han sido simulados como elementos de toma de agua por parte de los usuarios, cambiando para ello, la altura de los mismos en el tiempo. Los coeficientes de los vertederos y compuertas han sido calibrados utilizando datos de mediciones experimentales. El vertedero aguas abajo ha sido modelado con relaciones Q-h, a partir de la ecuación general de vertederos con el coeficiente de caudal calibrado. El modelo calibrado ha sido validado también con mediciones hechas en el laboratorio.

El controlador ha sido programado con Matlab. El software SIC envía las señales (variable de control, variable controlada y las variables medidas) a Matlab y este último calcula la variable de control y se la devuelve al SIC en cada tiempo de muestreo. De esta manera los dos programas ejecutan simultáneamente.

3.2.3 Diseño del controlador

En este laboratorio se pueden probar diferentes esquemas de control. Sin embargo para fines de ilustración, en este trabajo se ha implementado un controlador predictivo para un sistema monovariante. El canal está configurado como un tramo, por lo cual, aguas arriba se encuentra la compuerta 1 que conecta el canal con el reservorio depósito de cabecera de nivel constante y aguas abajo, hay un vertedero al final del tramo (Figura 2).

El objetivo es controlar el caudal aguas abajo (Q_d) con la apertura de la compuerta 1 (G_1) como variable del control. Se ha elegido el caudal como la variable controlada porque las necesidades de los regantes muchas veces son definidas en términos de caudales.

El mismo archivo desarrollado en Matlab se puede utilizar (con algunas modificaciones) para implementar el controlador en el laboratorio, ya que éste a su vez está programado en un bloque simulink del tipo función incrustada de Matlab (embedded Matlab function). El canal se ha configurado como un sistema SISO, con un solo tramo, por lo cual las compuertas que están en el intermedio del canal, G_3 y G_5 , se dejan completamente abiertas y el vertedero al final del tramo, W_4 , se ha configurado con una altura de 40cm para el experimento mostrado en este trabajo.

4 Resultados

Se han comprobado dos casos diferentes: en el primero se muestra el comportamiento del sistema (incluyendo el controlador) a cambios de consigna, y en el caso 2 se muestra la respuesta a perturbaciones desconocidas.

4.1 Caso 1: Seguimiento de consigna

La prueba simula los cambios de consigna (Tabla 1), que representa el caudal pedido por los regantes aguas abajo. En Figura 5 con rojo se puede ver la consigna y en azul la medida (indirecta) del caudal aguas abajo y con negro la simulación del caudal aguas abajo.

Tabla 1 Caso 1, Cambio de la consigna

Tiempo (s)	Q_{consigna} (l/s)
0	100
1500	60
3000	90
4500	70

En la simulación, el caudal después de un sobreimpulso sigue la consigna y siempre alcanza la consigna dentro de 1000 segundos. En el caso real, el caudal sigue la consigna también haciendo un sobreimpulso pero con un error en estado estacionario diferente de cero. La diferencia entre el caudal y la consigna está dentro del rango del error que aceptamos en el canal de laboratorio.

4.2 Caso 2: Respuesta a perturbaciones

En esta prueba se generan perturbaciones externas abriendo una toma de agua (vertedero 3), 45 metros aguas arriba del caudal controlado (Tabla 2). Estas tomas no están incluidas en el modelo del controlador, y por lo tanto se comportan como perturbaciones desconocidas. En el segundo 600 se empieza a quitar 9.5 litros por segundo. En la simulación, el caudal alcanza la consigna dentro de 500s y en el caso real se necesitan 1000s. En 2000s, se cierra el vertedero 3, observándose que el tiempo de respuesta es el mismo que el presente durante la abertura (Figura 6).

Tabla 2 Caso 2, Respuesta a perturbaciones

Tiempo (s)	Q_{W1} (l/s)	Q_{W3} (l/s)
0	0	0
600	-9.5	0
1990	0	0
3090	0	-15

La diferencia entre los valores medidos y simulados son debidas al movimiento mínimo de las compuertas y los errores aceptados en la medición de variables en el canal. En 3090 s, se abre otra toma (135 metros aguas arriba del caudal controlado, vertedero 1) y quitamos 15 l/s caudal. El controlador también responde como se ha explicado previamente.

Los movimientos de las compuertas se ven en la Figura 7: con color azul la medición y con color negro la simulación. La apertura medida se ve fluctuando, pero en realidad la compuerta queda quieta, las fluctuaciones son sólo las de la medición. La diferencia entre las aperturas simuladas y medidas es debida a las causas explicadas arriba.

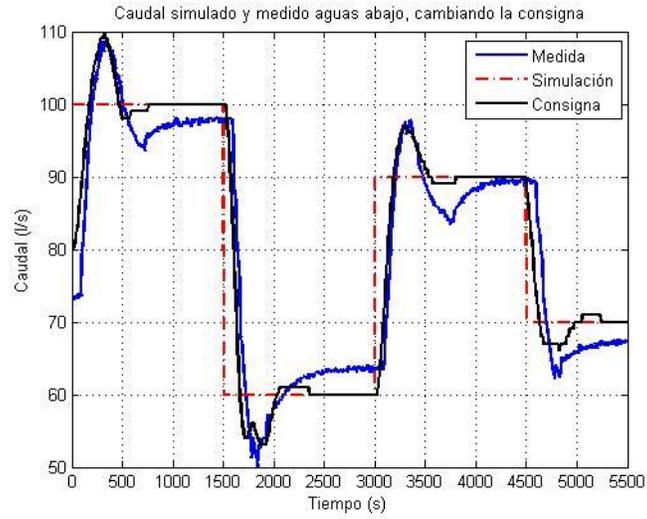


Figura 4 Comportamiento dinámico de la variable controlada

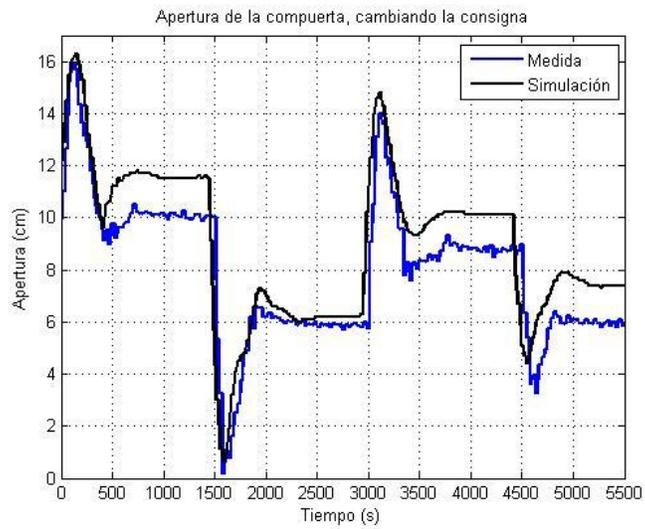


Figura 5 Comportamiento dinámico de la variable de control

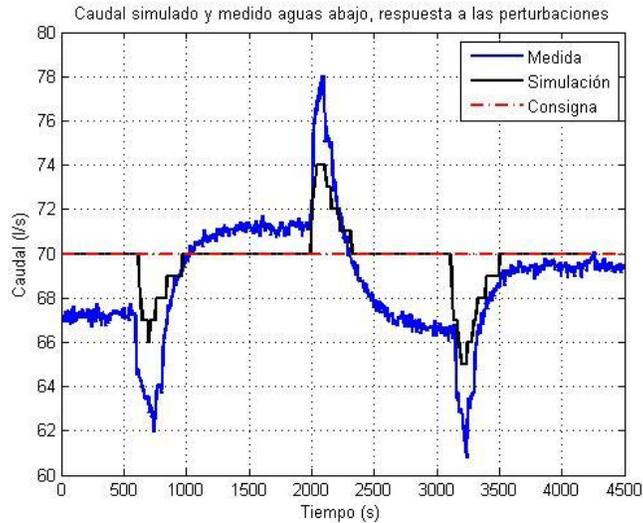


Figura 6 Comportamiento de la variable controlada ante la presencia de perturbaciones

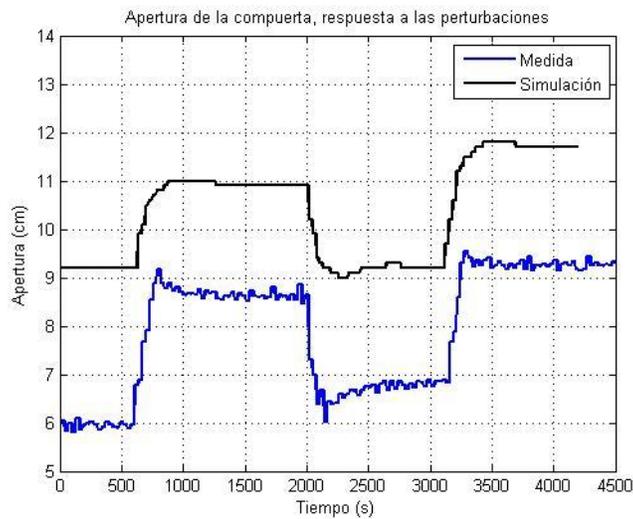


Figura 7 Comportamiento de la variable de control ante la presencia de perturbaciones

5 Conclusiones

En este artículo, se ha implementado un controlador predictivo en el canal de laboratorio existente en la UPC al igual que en el simulador SIC. La simulación numérica representa de buena manera el comportamiento real del controlador, demostrándose cómo se pueden verificar algoritmos de control antes de implementarlos en canales reales. Por otro lado, hay restricciones en la vida real que no se han simulado pero que si modifican ligeramente el comportamiento dinámico de las variables del sistema, por ejemplo las imprecisiones de los instrumentos. Sin embargo los datos obtenidos en la simulación dan al diseñador una idea aproximada inicial del rendimiento, lo cual puede representar un ahorro en el tiempo de elaboración de los experimentos. Por consiguiente, para personas

involucradas en la gestión de recursos hídricos, el simulador y el canal experimental, representan herramientas complementarias para el diseño de controladores.

En el ejemplo aquí descrito, utilizando como variable del control la apertura de la compuerta aguas arriba y como variable controlada el caudal aguas abajo, el controlador predictivo maneja satisfactoriamente el canal dentro del rango de error aceptable. El controlador es capaz de hacer que el sistema siga los cambios de la consigna y responder a las perturbaciones externas acotadas.

Finalmente, aunque actualmente hay pocos laboratorios para probar algoritmos de control en canales de riego, son herramientas muy útiles para comprobar algoritmos de control y pueden considerarse como un paso intermedio entre la simulación numérica y la implementación en campo.

Referencias

[1] World Water Assessment Programme. The united nations world water development report 3: Water in a changing world. Paris: UNESCO, 2009.

[2] Malaterre, P. O. and Baume, J. P., "SIC 3.0, a simulation model for canal automation design". In "International Workshop on Regulation of Irrigation Canals: State of Art of Research and Applications", Mokhlisse, A., editors. L.A.A.A.-C.N.R.S. (Marrakech), pp. 68-75 (1997).

[3] Ratinho, T., Figueiredo, J. and Rijo, M. "Modelling, control and field tests on an experimental irrigation canal". In "Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation", (Lisbon, Portugal), pp. 53-62 (2002).

[4] Lemos, J., Machado, F., Nogueira, N., Rato, L. and Rijo, M., "Adaptive and non-adaptive model predictive control of an irrigation channel", Networks and Heterogeneous Media, Vol 4, pp. 303-324 (2009).

[5] Begovich, O., Felipe, J. and Ruiz, V., "Real-time implementation of a decentralized control for an open irrigation canal prototype", Asian Journal of Control, Vol 9, pp. 170-179 (2007).

[6] Cunge, J. A. "On The Subject Of A Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method)", Journal of Hydraulic Research, Vol 7, pp. 205-230 (1969).

[7] Martín Sánchez, J. M. and Rodellar, J. *Control Adaptativo Predictivo Experto: Metodología, Diseño y Aplicación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (Madrid), pp. 533. (2005).

[8] Sawadogo, S. Modélisation, commande prédictive et supervision d'un système d'irrigation. Thesis Doctoral, LAAS-CNRS, Toulouse; 1992.

[9] Gomez, M. "Decentralized predictive control of multi-reach canals", 1998 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOLS 1-5, pp. 3885-3890 (1998).

[10] Sawadogo, S., Malaterre, P. O., Niang, A. and Faye, R., "Multivariable generalized predictive control with feedforward for on-demand operation of irrigation canals". In "International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals", Mokhlisse, A., editors. L.A.A.A.-C.N.R.S. (Marrakech), pp. 249-257 (1997).

[11] Sawadogo, S., Faye, R., Malaterre, P. and Mora-Camino, F., "Decentralized predictive controller for delivery canals", 1998 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOLS 1-5, pp. 3880-3884 (1998).

- [12] Ruiz, V. and Ramirez, J. "Predictive control in irrigation canal operation". In "International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Conference Proceeding", (San Diego, United States), pp. 3897-3901 (1998).
- [13] Akouz, K. "Predictive control applied to ASCE canal 2", 1998 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOLS 1-5, pp. 3920-3924 (1998).
- [14] Sawadogo, S., Faye, R., Benhammou, A. and Akouz, K., "Decentralized adaptive predictive control of multi-reach irrigation canal", SMC 2000 CONFERENCE PROCEEDINGS: 2000 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN CYBERNETICS, VOL 1-5, pp. 3437-3442 (2000).
- [15] Wahlin, B. "Performance of model predictive control on ASCE test canal 1", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 130, pp. 227-238 (2004).
- [16] Lemos, J. M., Rato, L. M., Machado, F., Nogueira, N., Salgueiro, P. and Neves-Silva, R. "Predictive adaptive control of water level in canal pools". In "Proceedings of the 16th International Conference on Systems Science", (Wroclaw, Poland), (2007).
- [17] Begovich, O., Ruiz, V., Besancon, G., Aldana, C. and Georges, D., "Predictive control with constraints of a multi-pool irrigation canal prototype", Latin American Applied Research, Vol 37, pp. 177-185 (2007).
- [18] Rato, L., Salgueiro, P., Lemos, J. and Rijo, M. "Adaptive predictive controller applied to an open water canal". In "Proceedings of the Fourth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics", (France), pp. 357-360 (2007).
- [19] van Overloop, P. J. Model predictive control on open water systems. Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands; 2006.
- [20] van Overloop, P. J. "Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District's WM Canal", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 136, pp. 747-756 (2010).
- [21] Rodellar, J. "Control Method for On-Demand Operation of Open Channel Flow", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 119, pp. 225-241 (1993).