

# EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE ALGORITMOS DE CONTROL DE CANALES DE RIEGO

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF CONTROL ALGORITHMS FOR IRRIGATION CANALS

Jorge V. Prado-Hernández<sup>1</sup>, Benjamín De León-Mojarro<sup>2</sup>, Víctor M. Ruiz-Carmona<sup>2</sup>,  
Adolfo Exebio-García<sup>1</sup> y Enrique Mejía-Sáenz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Especialidad en Hidrociencias. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo. Estado de México. (vprado30@yahoo.com.mx, exebio@colpos.mx, mejiasae@colpos.mx).  
<sup>2</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. C.N.A. Jiutepec, Morelos. (bleon@riego.imta.mx, vmruiz@tlaloc.imta.mx)

### RESUMEN

Con el propósito de mejorar la operación de canales de riego se probó, en un canal experimental, un esquema de regulación aguas arriba mediante la instrumentación de una serie de compuertas deslizantes y del uso de un sistema de control, supervisión y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés). El esquema de regulación tiene un lazo de control abierto para anticiparse a las demandas de riego, a partir de su conocimiento previo y de un modelo de propagación de caudal; y otro cerrado para corregir el nivel al final de cada tramo, manipulando la estructura de control ubicada aguas abajo. La corrección en lazo cerrado se calcula mediante un controlador escrito en terminología estándar RST, donde R, S y T son polinomios asociados a la variable a controlar, de control y de referencia, respectivamente. Se probaron dos tipos de controladores, que son dos formas distintas de obtener los polinomios R, S y T: el primero basado en un algoritmo del tipo Proporcional e Integral bajo dos variantes: el clásico (PI), y otro que incluye un factor para corregir sus parámetros en los distintos puntos de operación (PI×UF); y el segundo mediante ubicación de polos. Los resultados obtenidos con el controlador PI×UF muestran que la instrumentación de estructuras de control, y la aplicación de sistemas de supervisión y control mejora la operación de canales de riego. La metodología de regulación usada es fácilmente adaptable a la configuración física de la red de canales de los distritos de riego de México.

**Palabras clave:** Algoritmos de control de canales, regulación de canales.

### INTRODUCCIÓN

Las áreas agrícolas de los distritos y unidades de riego generan la mayor parte de la producción agrícola en México. En estas zonas la disminución de la disponibilidad y la competencia por el agua han obligado a emprender programas de tecnificación

### ABSTRACT

With the goal of improving the operation of irrigation canals an upstream regulation scheme, by means of the instrumentation of a series of sliding flood gates and the use of a supervisory control and data acquisition system (SCADA), was tested. The regulation scheme has an open loop control to anticipate water demand, starting from previous knowledge and a water flow propagation model; and a closed loop control to correct the water level at the end of each pool by manipulating the control structure located downstream. Closed loop correction is calculated by using a controller written in standard RST terminology. R, S and T are polynomials associated to the variable to be controlled, the control and the reference variables, respectively. Two types of controllers, or two different ways of obtaining R, S and T, were tested. One was based on a Proportional and Integral algorithm under two variants the classical (PI), and another one which includes a factor to verify their parameters at the different operation points (PI×UF); and the second uses poles placement. The results obtained with the PI×UF controller show that the instrumentation of control structures and the application of supervision and control systems improve the operation of irrigation canals. The control methodology used is easily adaptable to the physical configuration of the canal networks of the irrigation districts in México.

**Key words:** Canal control algorithms, canal regulation.

### INTRODUCTION

The agricultural areas of the irrigation districts and units yield most of México's agricultural production. In these areas, competition for water, along with its decreasing availability, have forced the creation of programs of full modernization to improve the use of this resource and its productivity. With these programs, thousands of hectares have been technified with high and low-pressure irrigation systems, and collective, low pressure networks have been built on 500 to 4000 ha surfaces in several irrigation districts.

Recibido: Junio, 2002. Aprobado: Junio, 2003.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 37: 393-403. 2003.

integral para mejorar la eficiencia del uso de este recurso y su productividad. Mediante estos programas se ha tecnificado con sistemas de riego de baja y alta presión miles de hectáreas y construido redes colectivas de baja presión en superficies de 500 a 4 000 ha en varios distritos de riego. Esta transformación de los sistemas de riego parcelario y de la distribución interparcelaria, necesita un cambio en la regulación de los canales principales para proporcionar un servicio de riego flexible, seguro y eficiente.

Con el propósito de mejorar la operación en algunos distritos de riego del país, se han instalado compuertas hidromecánicas (AMIL, AVIO y AVIS) con sistemas electromecánicos, y se han instrumentado compuertas con controles para realizar una operación remota. En ambos casos no se ha observado ventajas significativas respecto a la operación con las estructuras de control tradicionales.

En los últimos veinte años se ha desarrollado varios algoritmos de control, como el Proporcional-Integral-Derivativo (PID), ubicación de polos, localización de raíces, control predictivo, regulador cuadrático lineal (LQR por sus siglas en inglés) o heurísticos, para mejorar la operación de canales de riego, a partir de la generación de reglas de control para adaptar el transporte y la distribución del agua en los canales principales a los programas de extracción de las tomas laterales (Malaterre *et al.*, 1998). Los resultados han sido buenos; sin embargo, estos algoritmos se han probado bajo simulación y en circunstancias diferentes.

La aplicación de estos algoritmos en las zonas de riego demanda información sobre las variables, instrumentación de estructuras de control y medios sofisticados para la transmisión de la información; es decir, están orientados a una operación automatizada de los canales. Al respecto se tiene poca experiencia (Clemmens, 1999); por tal razón, en el presente trabajo se intenta probar que la instrumentación de estructuras de control y la aplicación de sistemas de supervisión y control permite mejorar la operación de canales de riego. Se plantea un esquema de regulación para cada tramo de canal implementado mediante un sistema de control, supervisión y adquisición de datos (SCADA), para evaluar y comparar el funcionamiento de algunos de los algoritmos propuestos para analizar los factores que impiden o limitan su aplicación.

Los algoritmos de control se pueden separar en tres grandes grupos de acuerdo con los objetivos generales en la operación de canales: regulación de tirante, gasto o volumen. Las variables de control son las aberturas de compuerta y el caudal.

Un algoritmo de control de canales se define como un procedimiento lógico que mediante cambios en la variable de entrada (variable a regular), y su valor de

This transformation of the parceling irrigation systems and of the irrigation zones distribution needs a change in the regulation of the main canals in order to provide a flexible, safe and efficient irrigation service.

With the purpose of improving operations in some irrigation districts in the country, hydro mechanic floodgates (AMIL, AVIO y AVIS) with electro mechanic systems have been installed, and floodgates with controls have been instrumented for remote operations. In both cases, no significant advantages have been observed, in comparison to operation with traditional control structures.

In the last twenty years, several control algorithms have been developed, such as the Proportional-Integral-Derivative (PID), pole placement, root locus, predictive control, Linear Quadratic Regulator (LQR) or heuristic, in order to improve operations in irrigation canals, based on control rules for adapting water distribution and transportation in the main canals to extraction programs of the lateral offtakes (Malaterre *et al.*, 1998). Results have been favorable; however, these algorithms have been tested under simulation and under different circumstances.

The application of these algorithms in the irrigation areas demands information about the variables, instrumentation of control structures and sophisticated media for transmitting information; that is, they are oriented towards an automation of the canals. The experience in this area is little (Clemmens, 1999); hence, in this paper it is attempted to prove that the instrumentation of control structures and the application of control and supervisory systems help to improve the operation of irrigation canals. A regulation scheme is described for each pool of canal implemented by means of a supervisory control, and data acquisition system (SCADA) to evaluate and compare the functioning of the proposed algorithms to analyze the factors that limit or obstruct their application.

Algorithm controls may be separated into three groups, according to the general objectives in canal operation: regulation of water level, flow or volume. The control variables are floodgate opening and water flow.

A canal control algorithm is defined as a logical procedure which, by means of changes in the input variable (regulation variable) and its reference value, produces an output (control variable) to compensate the error between reference and observed values (Rogers and Goussard, 1998).

An open loop must be included in regulation schemes in order to anticipate irrigation demands, and a closed loop to regulate levels caused by the first correction, or to correct small, unforeseen perturbations (Clemmens, 1999; Brenes *et al.*, 2000).

When an open loop correction is made on a system, the output (in this case, the variable to be regulated) has

referencia produce una salida (variable de control), para compensar el error entre el valor de referencia y el observado (Rogers y Goussard, 1998).

En los esquemas de regulación se debe incluir un lazo abierto para anticiparse a las demandas de riego y un lazo cerrado para regular niveles producto de la primera corrección o para corregir pequeñas perturbaciones imprevistas (Clemmens, 1999; Brenes *et al.*, 2000).

Cuando se realiza una corrección en lazo abierto en un sistema, la salida (en este caso, la variable a regular) no tiene efecto sobre la entrada o acción de control (estímulo del sistema). Si existe efecto entre éstas cuando se efectúa una corrección en lazo cerrado, hay una retroalimentación en el sistema (Ruiz *et al.*, 1998).

Dos conceptos usados en la operación de canales son: método de operación, y método de regulación o control. El primero se clasifica en función del lugar donde se desea mantener constante el nivel del agua en cada tramo de canal, y el segundo, en función de la ubicación de la variable que se regula respecto a la estructura (USBR, 1995).

## METODOLOGÍA

### Características del canal experimental

La implementación de los algoritmos de control en el estudio se llevó a cabo en el canal largo del laboratorio de hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Figura 1).

De acuerdo con la instrumentación del canal, el esquema de regulación que se pudo probar es aguas arriba y los algoritmos de estudio fueron el Proporcional-Integral-Derivativo (PID), y por ubicación de polos. La variable a regular y de medición es el nivel al final del tramo (nivel aguas arriba de la compuerta), y la variable de control es la abertura de la compuerta deslizante situada aguas abajo del tramo.

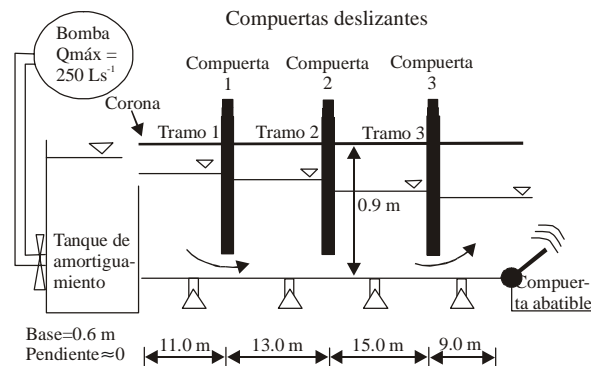


Figura 1. Esquema del canal experimental.  
Figure 1. Experimental canal scheme.

no effect on the input or the control action (system stimulation). If there is an effect between them when a closed loop correction is made, there is a feedback in the system (Ruiz *et al.*, 1998).

Two concepts used in canal operations are: operation method and regulation or control method. The classification of the first depends on the place where the water level is to be kept constant in each pool of the canal; and that of the second, on the location of the variable to be regulated, with respect to the structure (USBR, 1995).

## METHODOLOGY

### Characteristics of the experimental canal

The implementation of this study control algorithms was carried out in the long canal of the hydraulics laboratory of the Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Figura 1).

According to the instrumentation of the canal, the regulation scheme that could be tested is upstream, and the study algorithms were the Proportional-Integral-Derivative (PID), and pole placement. The measuring variable to be regulated is level at the end of the pool (level upstream from the floodgate), and the control variable is the opening of the sliding floodgate, located downstream from the pool.

### Description of the system for control, supervision and data acquisition (SCADA)

The implementation of the control algorithms in the experimental canal was carried out using the SCADA system, made up of: level sensors and limit interrupters; linear actuator for sliding the floodgate; floodgate operation panel; programmable logic controller (PLC) for processing the signals and calculating the amount of the maneuver; and a working station with 100 MHz and 16 MB RAM for long distance operations, monitoring, analyzing and recording the situation of the variables involved in the control system (Figure 2).

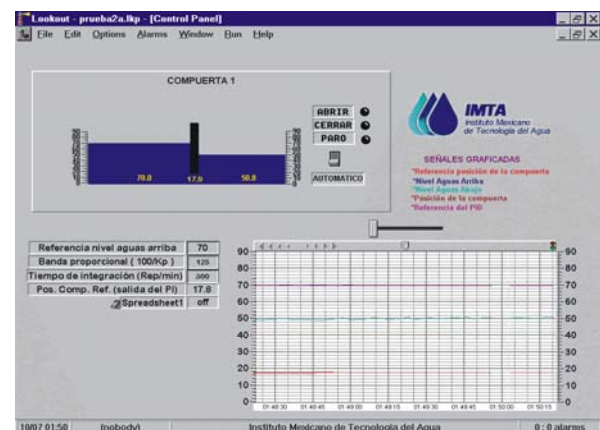


Figura 2. Interfase hombre-máquina.  
Figure 2. Supervisory window.

### Descripción del sistema para control, supervisión y adquisición de datos (SCADA)

La implementación de los algoritmos de control en el canal experimental se hizo mediante el sistema SCADA, compuesto por: sensores de nivel e interruptores límite; actuador lineal para desplazar la compuerta; panel de operación de la compuerta; controlador lógico programable (PLC) para procesar las señales y realizar el cálculo de la cantidad de la maniobra; y una estación maestra (PC) de 100 MHz y 16 MB de memoria RAM para operar a distancia, monitorear, analizar y registrar la situación de las variables involucradas en el sistema de control (Figura 2).

### Diseño del sistema de control

Se plantea un sistema de control en el cual los niveles del agua al final de cada tramo son regulados por acciones de las compuertas deslizantes respectivas situadas aguas abajo. Las acciones de control son calculadas por los PLC de cada compuerta y son programadas en este procesador mediante un editor con lenguaje en lógica de escalera. El esquema de regulación propuesto incluye dos lazos de control; uno en lazo abierto para compensar las necesidades de riego previstas y otro, en lazo cerrado, para corregir niveles debidos a la primera corrección, a las perturbaciones imprevistas y a errores propios de la modelación. Burt *et al.* (1998) señalan que en la práctica las maniobras de las estructuras de control son ejecutadas esencialmente en forma discreta. En la Figura 3 se presenta en diagrama de bloques el esquema de regulación para cada tramo en tiempo discreto  $k$  (para un instante de muestreo).

De acuerdo con la Figura 3 la acción necesaria para efectuar la regulación, conocida como ley de control, es:

$$S(q^{-1})u(k) = T(q^{-1})y^*(k) - R(q^{-1})y(k) \quad (1)$$

Así, el problema consiste en obtener los polinomios  $R(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$  y  $T(q^{-1})$  de la Ecuación 1 para cada uno de los algoritmos propuestos para poder calcular el movimiento de compuerta requerido para corregir el error.

La regulación de cada tramo de canal consta de tres módulos independientes: previsión de las necesidades de riego (predicción) expresadas como un caudal ( $L^3 T^{-1}$ ), representación de la dinámica del sistema (proceso) y cálculo de las maniobras (controlador). Enseguida se explica cada una de las etapas anteriores.

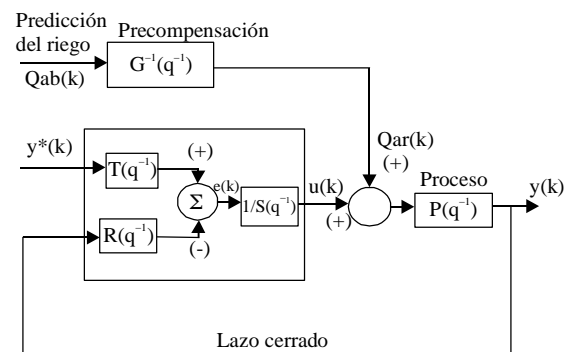
### Cálculo de la previsión de las necesidades de riego

La previsión del riego está parcialmente resuelta mediante un Sistema de Pronóstico del Riego en Tiempo Real (SPRITER). Es un sistema muy preciso que se tiene validado y actualmente se encuentra operando en algunos distritos de riego de México con excelentes resultados (Ojeda y González, 2000).

### Design of the control system

A control system is proposed, in which the water levels at the end of each pool are regulated by means of the sliding floodgates, located further downstream. The control actions are calculated by each floodgate's PLC and are programmed in this processor with an editor with a stairway logic language. The regulation scheme suggested includes two control loops: one in open loop, to make up for the forecasted irrigation needs, and another, in closed loop, to correct levels due to the first correction, to unforeseen obstacles and to errors due to the representation model. Burt *et al.* (1998) point out that in practice, control structure operations are carried out essentially in discrete ways. Figure 3 shows, in a block diagram, the regulation scheme for each pool in discrete time,  $k$  (for a instant of sampling).

According to Figure 3, the necessary action to be taken for regulation, known as control law, is:



**Figura 3. Sistema de regulación en bloques para cada tramo<sup>†</sup>.  
Figura 3. Diagram block regulation system for each pool<sup>†</sup>.**

<sup>†</sup>  $y^*(k)$  y  $y(k)$  = niveles de referencia y observado aguas arriba de la compuerta, [cm];  $e(k) = y^*(k) - y(k)$  = error, [cm];  $u(k)$  = posición de la compuerta, [cm];  $Qab(k)$  y  $Qar(k)$  = gasto aguas abajo y aguas arriba del tramo, [ $Ls^{-1}$ ];  $q^{-1}$  = operador de retardo unitario definido como  $q^{-1} x(k) = x(k-1)$  y en general  $q^{-n} x(k) = x(k-n)$ , donde  $x$  puede ser la variable de entrada o salida del sistema.

$P(q^{-1})$  = dinámica (proceso) entre el nivel aguas arriba de la compuerta  $y(k)$  y la posición de la compuerta  $u(k)$ ;  $G^{-1}(q^{-1})$  = función de transferencia que representa la dinámica entre el gasto aguas arriba  $Qar(k)$  y aguas abajo  $Qab(k)$  de cada tramo;  $R(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$ ,  $T(q^{-1})$  = polinomios que caracterizan el controlador, donde cada uno está asociado respectivamente con la variable a controlar  $y(k)$ , de control  $u(k)$  y de referencia  $y^*(K)$  ♦  $[y^*(k)$  and  $y(k)$  = reference water level (setpoint) and upstream water level of floodgate, [cm];  $e(k) = y^*(k) - y(k)$  = error, [cm];  $u(k)$  = floodgate position, [cm];  $Qab(k)$  and  $Qar(k)$  = pool downstream flow and pool upstream flow, respectively, [ $Ls^{-1}$ ];  $q^{-1}$  = unitary delay operator defined as  $q^{-1} x(k) = x(k-1)$ , their general expression is  $q^{-n} x(k) = x(k-n)$ ;  $P(q^{-1})$  = water level transfer function (process): relation upstream water level of floodgate  $y(k)$  and floodgate position  $u(k)$ ;  $G^{-1}(q^{-1})$  = pool flow transfer function (represents the dynamic relation of the downstream flow and upstream flow of each pool);  $G(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$ ,  $T(q^{-1})$  = polynomials of the controller associate with the variable to control or measured  $y(k)$ , command variable  $u(k)$  and the reference variable  $y^*(K)$ .

### Dinámica del sistema

Después de realizar varias pruebas en lazo abierto, fue necesario establecer un gasto constante en el canal de  $80 \text{ L s}^{-1}$  y niveles de operación de 70, 55 y 40 cm para los tramos uno, dos y tres, y recurrir a modelos de grado mayor a uno para representar adecuadamente la dinámica del sistema alrededor de un punto de operación. El modelo discreto adoptado para cada tramo, entre el nivel aguas arriba de la compuerta  $y(k)$  y la posición de la compuerta  $u(k)$ , es (Ruiz *et al.*, 1998):

$$\frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)} = P(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = q^{-d} \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}} \quad (2)$$

donde  $\Delta$  = retardo, definido como el tiempo que tarda en observarse en la salida del sistema un cambio en la entrada, y se expresa en múltiplos enteros del período de muestreo, [adim.];  $a_i$  y  $b_i$  = coeficientes constantes a determinar, [adim.];  $na \geq nb$ : grado de los polinomios  $A(q^{-1})$  y  $B(q^{-1})$ .

Para obtener el grado y coeficientes de los polinomios  $A(q^{-1})$  y  $B(q^{-1})$  se estimula el sistema, simulando la posición base de la compuerta con señales binarias en una amplia gama de frecuencias de longitud  $2^4 - 1$  (Brenes *et al.*, 2000).

La estimación de los parámetros se hizo por mínimos cuadrados, usando un período de muestreo (T) de 5 s. Los modelos que representaron mejor la dinámica del sistema fueron de segundo orden con un retardo de un período de muestreo (5 s). Por ejemplo, para el tramo uno:

$$\frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)} = q^{-1} \frac{-0.0480}{1 - 1.7820q^{-1} + 0.8100q^{-2}} \quad (3)$$

Para representar la dinámica entre el gasto al final ( $\Delta Q_{ab}$ ) y a la entrada de cada tramo ( $\Delta Q_{ar}$ ) se propuso un modelo lineal discreto, igual a un retardo puro:

$$G(q^{-1}) = \frac{\Delta Q_{ab}(q^{-1})}{\Delta Q_{ar}(q^{-1})} = q^{-d} \quad (4)$$

Los retardos en múltiplos del período del muestreo para los tramos uno, dos, tres y cuatro fueron uno, uno, dos y uno.

### Controlador

#### Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Para sistemas continuos, y para cualquier instante de tiempo,  $t$ , la acción de control PID se obtiene de forma proporcional, integral y derivativa al error existente entre el valor de referencia  $y(t^*)$  y el valor observado  $y(t)$ :

$$S(q^{-1})u(k) = T(q^{-1})y^*(k) - R(q^{-1})y(k) \quad (1)$$

Thus, the problem is to obtain the  $R(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$  and  $T(q^{-1})$  polynomials of equation 1 for each one of the proposed algorithms to be able to calculate the movement of the floodgate required for correcting the error.

The regulation of each pool of canal is made up of three independent modules: foresight of irrigation needs (prediction), expressed as a flow ( $\text{L}^3 \text{T}^{-1}$ ); representation of the system dynamics (processing) and maneuver calculation (controlling). Next, each one of the aforementioned stages is explained.

#### Calculation of the foresight of irrigation needs

The problem of foreseeing irrigation is partially solved, by means of a Real Time Irrigation Forecast System (SPRITER). This is a very precise system, which has been validated and is now functioning in several irrigation districts in México, with excellent results (Ojeda y González 2000).

#### Dynamics of the system

After carrying out several open loop tests, it was deemed necessary to establish a constant supply in the canal with 80 liters per second, and operation levels of 70, 55 and 40 cm for pools one, two and three, and to resort to models of degree greater than one, to adequately represent the system's dynamics around an operation point. The discrete model adopted for each pool between the level upstream from floodgate  $y(k)$  and the position of the floodgate  $u(k)$ , is (Ruiz *et al.*, 1998):

$$\frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)} = P(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = q^{-d} \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}} \quad (2)$$

where  $\Delta$  = delay, defined as the time taken for a change in the input to create a visible change in the output, and is expressed in whole multiples of the sampling period [adim];  $a_i$  and  $b_j$  = constant coefficients to be determined [adim];  $na \geq nb$ : degree of the polynomials  $A(q^{-1})$  and  $B(q^{-1})$ .

To obtain the degree and coefficients of the polynomials  $A(q^{-1})$  and  $B(q^{-1})$ , the system must be excited by simulating the basic position of the floodgate with binary signals in a wide range of frequencies of length  $2^4 - 1$  (Brenes *et al.*, 2000).

The estimation of parameters was done by least squares, using a sampling period (T) of 5 s. The models which best represented the dynamics of the system were of second order, with a lag of one sampling period (5 s). For example, for pool one:

$$\frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)} = q^{-1} \frac{-0.0480}{1 - 1.7820q^{-1} + 0.8100q^{-2}} \quad (3)$$

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

donde  $u(t)$  = posición de la compuerta al instante de tiempo  $t$ , [cm];  $e(t)$  = error al instante de tiempo  $t$ , [cm];  $K_p$  = constante de proporcionalidad, [adim.];  $T_i$  y  $T_d$  = tiempo de integración y tiempo de derivación, [s].

En tiempo discreto  $k$ , la cantidad de movimiento de compuerta ( $\Delta u(k)$ ) requerido para corregir el error  $e(k)$  se obtiene a partir de la Ecuación 5, considerando la diferencia hacia atrás en  $u(k)$ , es decir,  $u(k) - u(k-1)$ , y aproximando el término integral mediante la sumatoria trapezoidal y el término derivativo mediante la diferencia de dos puntos. Sustituyendo valores en la Ecuación 5 y escribiendo el resultado en términos de la ley de control RST (Ecuación 1), se tiene:

$$\Delta u(k) = T(q^{-1})y^*(k) - R(q^{-1})y(k) = R(q^{-1})e(k) \quad (6)$$

donde  $e(k) = y^*(k) - y(k)$  = error, [cm];  $S(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$ ;  $T(q^{-1}) = R(q^{-1}) = t_0 + t_1 q^{-1}$ .

Como en los canales de riego generalmente se desprecia el término derivativo, debido a la presencia de retardos, los coeficientes de los polinomios  $T(q^{-1})$  y  $R(q^{-1})$  son:

$$\begin{aligned} t_0 &= K_p + K_i / 2; \quad t_1 = -K_p + K_i / 2; \\ K_i &= (K_p * T) / T_i \text{ (constante de integración), [adim.];} \\ T &= \text{tiempo de muestreo, [s].} \end{aligned}$$

Por ello, en lo sucesivo el controlador PID se denominará Proporcional e Integral (PI).

Los parámetros  $K_p$  y  $T_i$  se obtienen a partir de pruebas en lazo cerrado (Franklin *et al.*, 1995), con la finalidad de incluir la dinámica de los componentes del sistema SCADA. Los parámetros de  $K_p$  para las compuertas deslizantes uno, dos y tres fueron de 0.80, 0.40 y 0.43, y para  $T_i$ , 20, 30 y 60 s.

Con el propósito de que el controlador PI regule en un intervalo amplio alrededor del punto de operación, se introdujo en él un factor de corrección universal (UF) propuesto por Burt *et al.* (1998), cuya función es corregir automáticamente los parámetros del controlador dependiendo del punto de operación. En este caso el controlador se denomina Controlador Proporcional e Integral con factor universal (PI×UF).

El factor universal se define como:

$$UF(k) = a(X(k))^b \quad (7)$$

donde  $UF(k)$  = cambio relativo en abertura de compuerta, requerido para compensar un cambio de 3.0 cm en el nivel aguas arriba de la compuerta, suponiendo que ésta no se mueve cuando el

To represent the dynamics between the volume of flow at the end ( $\Delta Q_{ab}$ ) and at the start of each pool ( $\Delta Q_{ar}$ ), a discrete linear model was proposed, equivalent to one pure delay:

$$G(q^{-1}) = \frac{\Delta Q_{ab}(q^{-1})}{\Delta Q_{ar}(q^{-1})} = q^{-d} \quad (4)$$

The delays in multiples of the sampling period for pools one, two, three and four were one, one, two and one.

### Proportional-Integral-Derivative (PID) controller

For continuous systems, and for any length of time,  $t$ , the PID control action is obtained proportionally, integrally and derivatively to the error existent between the reference value  $y(t^*)$  and the observed value  $y(t)$ :

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

where  $u(t)$  = position of the floodgate at moment of time  $t$ , [cm];  $e(t)$  = error at moment of time  $t$ , [cm];  $K_p$  = proportionality constant, [adim.];  $T_i$  y  $T_d$  = time of integration and time of derivation, [s].

In discrete time  $k$ , the amount of floodgate movement ( $\Delta u(k)$ ) required to correct the error  $e(k)$  is obtained from equation 5, considering the difference backwards in  $u(k)$ , that is,  $u(k) - u(k-1)$ , and approximating the integral term by means of the trapezoidal sum, and the derivative term, using the difference between two points. Substituting values in equation 5 and writing the result in terms of the RST control law (Equation 1), we have:

$$\Delta u(k) = T(q^{-1})y^*(k) - R(q^{-1})y(k) = R(q^{-1})e(k) \quad (6)$$

where:  $e(k) = y^*(k) - y(k)$  = error, [cm];  $S(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$ ;  $T(q^{-1}) = R(q^{-1}) = t_0 + t_1 q^{-1}$ ;

Since in irrigation channels the derivative term is usually neglected, due to the presence of delays, the polynomial coefficients  $T(q^{-1})$  y  $R(q^{-1})$  are equal to:

$$\begin{aligned} t_0 &= K_p + K_i / 2; \quad t_1 = -K_p + K_i / 2; \\ K_i &= (K_p * T) / T_i \text{ (integration constant), [adim.];} \\ T &= \text{time of sampling, [s].} \end{aligned}$$

Hence, the PID controller will hereafter be named Proportional and Integral (PI).

Parameters  $K_p$  y  $T_i$  are obtained from tests in closed loop (Franklin *et al.*, 1995), with the purpose of including the dynamics of the SCADA system components. The  $K_p$  parameters for sliding

nivel cambia, [%];  $X(k)$  = abertura relativa de la compuerta [%], definida como el cociente resultante de dividir la abertura de la compuerta  $u(k)$  entre el nivel de referencia aguas arriba de la compuerta  $y^*(k)$ ;  $a$  y  $b$  = constantes para cada compuerta obtenidas mediante dos condiciones de gasto:  $60 \text{ Ls}^{-1}$  ( $u(k)/y^*(k) \approx 20\%$ ) y  $120 \text{ Ls}^{-1}$  ( $u(k)/y^*(k) \approx 50\%$ ).

### Controlador por ubicación de polos

El método de ubicación de polos consiste en determinar los parámetros de la ley de control RST representada por la Ecuación 1, a fin de ubicar en un lugar específico los polos (raíces del denominador) de la función de transferencia en lazo cerrado. Para tal efecto, el comportamiento en lazo cerrado (Figura 3) se iguala al deseado, es decir:

$$\frac{y(k)}{y^*(k)} = \frac{T(q^{-1})P(q^{-1})}{S(q^{-1}) + P(q^{-1})R(q^{-1})} = \frac{B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} = H_m(q^{-1}) \quad (8)$$

El modelo  $H_m(q^{-1})$  se propuso de tal forma que el sistema tuviera una reacción lenta para no saturar a los actuadores de las compuertas.

Por ejemplo, para la compuerta uno, al resolver la Ecuación 8 y sustituir los valores encontrados de los polinomios  $R(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$  y  $T(q^{-1})$  en la ley de control (Ecuación 1), se tiene que:

$$\Delta u(k) = -0.102y^*(k) + 6.08y(k) - 10.94y(k-1) + 4.96y(k-2), \quad (9)$$

lo que muestra que el movimiento de compuerta requerido en el instante  $K$  ( $\Delta u(k)$ ) para corregir el error  $e(k)$ , depende del nivel de referencia en el instante de tiempo  $k$  ( $y^*(k)$ ), del nivel del agua en el instante  $k$ ,  $y(k)$ , y de los dos anteriores instantes de muestreo:  $y(k-1)$  y  $y(k-2)$ .

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

El esquema de regulación aguas arriba probado para cada tramo, visto en el canal, se muestra en la Figura 4. Para generalizar las pruebas a sistemas de regulación aguas abajo y mixto, el canal experimental debe contar a la entrada con una válvula que permita manejar el gasto de forma remota.

### Condiciones iniciales en las pruebas de los sistemas de control

Las pruebas efectuadas parten de un gasto constante en el canal de  $80 \text{ Ls}^{-1}$ , sin extracciones laterales, y con

floodgates one, two and three were 0.80, 0.40 y 0.43, and for  $T_i$ , 20, 30 y 60 s.

In order for the PI controller to regulate on a wide range around the operation point, a universal correction factor (UF) was introduced into it, following Burt *et al.* (1998), which purpose is to automatically correct the parameters of the controller, depending on the operation point. In this case, the controller is known as Proportional and Integral Controller, with a universal factor (PI×UF).

The universal factor is defined as:

$$UF(k) = a(X(k))^b \quad (7)$$

where  $UF(k)$  = relative change in the floodgates apertures required to compensate a 3.0 cm change in the level upstream from the floodgate, supposing it does not move when the level changes, [%];  $X(k)$  = relative aperture of the floodgate (%), defined as the quotient of the floodgate aperture  $u(k)$  divided by the upstream reference level of the floodgate  $y^*(k)$ ;  $a$  and  $b$  = constants for each floodgate, obtained by two flow conditions:  $60 \text{ Ls}^{-1}$  [ $u(k)/y^*(k) \approx 20\%$ ] and  $120 \text{ Ls}^{-1}$  [ $u(k)/y^*(k) \approx 50\%$ ].

### Pole placement controller

The pole placement method consists in determining the parameters of the RST control law, represented by Equation 1, in order to locate the poles (denominator's roots) of the transfer function in closed loop, in a specific place. To that end, the behavior in closed loop (Figure 3) is equaled to the required one, that is:

$$\frac{y(k)}{y^*(k)} = \frac{T(q^{-1})P(q^{-1})}{S(q^{-1}) + P(q^{-1})R(q^{-1})} = \frac{B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} = H_m(q^{-1}) \quad (8)$$

The  $H_m(q^{-1})$  model was proposed in such a way that the system would have a slow reaction, and the actuators of the floodgates would not become saturated.

For instance, for floodgate one, once Equation 8 is solved and the values found for polynomials  $R(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$  and  $T(q^{-1})$  are substituted in the control law (Equation 1), we have:

$$\Delta u(k) = -0.102y^*(k) + 6.08y(k) - 10.94y(k-1) + 4.96y(k-2), \quad (9)$$

which shows that the floodgate movement required at instant  $K$  ( $\Delta u(k)$ ) to correct the error  $e(k)$ , depends on the reference level in the time moment  $k$  ( $y^*(k)$ ), of the water level in moment  $k$ ,  $y(k)$ , and on two previous samplings moments:  $y(k-1)$  and  $y(k-2)$ .

niveles al final de los tramos uno, dos y tres de 70, 55 y 40 cm.

Al probar los controladores por ubicación de polos se presentaron problemas con la regulación del nivel, por lo que el análisis siguiente se centra en los controladores PI y PI×UF.

### Pruebas en lazo abierto (predicción)

Al final del canal se produce un incremento previsto en la demanda a los 10 min; para un primer caso se pasa de 80 a 100 Ls<sup>-1</sup> y, en un segundo, de 80 a 120 Ls<sup>-1</sup>.

Considerando al canal como una serie de tramos conectados en cascada para el caso del transporte del gasto, el gasto requerido a la entrada del canal es:

$$\Delta Q_{ar1} = \left[ G_1^{-1}(q^{-1})G_2^{-1}(q^{-1})G_3^{-1}(q^{-1})G_4^{-1}(q^{-1}) \right] \Delta Q_{ab4} \quad (10)$$

$$\Delta Q_{ab4} = \left[ q^{d_1+d_2+d_3+d_4} \right] \Delta Q_{ab4}$$

donde  $d$  es el retardo y los subíndices 1, 2, 3 y 4 denotan los tramos 1, 2, 3 y 4. Por tanto, al sustituir los retardos en la Ecuación 10 se tiene que:

$$\Delta Q_{ar1} = q^5 \Delta Q_{ab4} \quad (11)$$

lo cual indica que el gasto a la entrada debe ser igual al demandado aguas abajo del tramo 4, con anticipación de 25.5, dado que el periodo de muestreo es 5 s.

En las Figuras 5 y 6 se muestra la evolución del nivel del tramo uno. Se observa un aumento por la acumulación de volumen debido al retardo entre la entrada y el final del canal; una vez que se realiza la extracción al final del canal, el nivel regresa a su posición normal. En ambos casos la corrección es adecuada y no fue necesaria la intervención de los controladores.

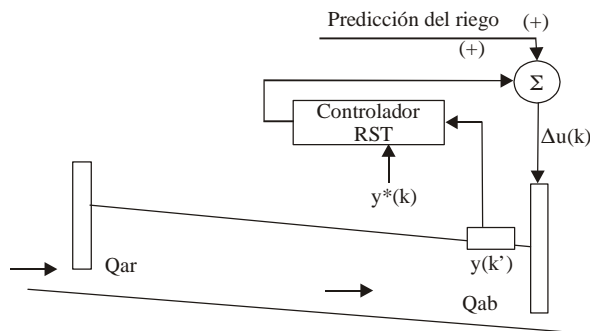


Figura 4. Esquema de regulación para cada tramo.  
Figura 4. Regulation scheme for each pool.

## RESULTS AND ANALYSIS

The upstream regulation scheme tested for each pool, as seen on the canal, is shown in Figure 4. To generalize the tests to downstream and mixed regulation systems, the experimental canal must contain a valve at the entrance, which would allow the remote control of the flow.

### Initial conditions in the control systems tests

The tests carried out are based on a constant water flow of 80 Ls<sup>-1</sup>, without lateral extractions, and with levels of 70, 55 and 40 cm at the end of pools one, two and three.

There were problems with the level regulation when testing the controllers by pole placement; therefore, the following analysis is focused on controllers PI and PI×UF.

### Open loop tests (prediction)

A foreseen increase in the demand is produced at the end of the canal after 10 minutes; in one case the increase was from 80 to 100 Ls<sup>-1</sup>, and in a second, from 80 to 120 Ls<sup>-1</sup>.

Considering the canal as a series of pools connected in cascade for the transportation of water, the water required at the entrance of the canal is:

$$\Delta Q_{ar1} = \left[ G_1^{-1}(q^{-1})G_2^{-1}(q^{-1})G_3^{-1}(q^{-1})G_4^{-1}(q^{-1}) \right] \Delta Q_{ab4} \quad (10)$$

$$\Delta Q_{ab4} = \left[ q^{d_1+d_2+d_3+d_4} \right] \Delta Q_{ab4}$$

where  $d$  is the delay, and subindexes 1, 2, 3 and 4 denote pools 1, 2, 3 and 4. Hence, substituting the delays in equation 10 we have:

$$\Delta Q_{ar1} = q^5 \Delta Q_{ab4} \quad (11)$$

which indicates that the flow at the entrance must be equal to that required downstream from pool 4, although 25 s must be anticipated, since the sampling period is 5 s.

Figures 5 and 6 show the evolution of the level in pool one. An increase due to the volume accumulation, because of the delay between the entrance and the end of the canal is observed; once the extraction has occurred at the end of the canal, the level returns to its normal position. In both cases, the correction is adequate and the controllers were not necessary.



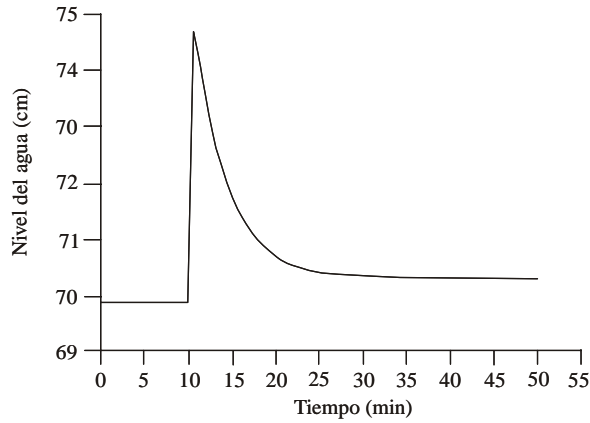


Figura 5. Regulación en lazo abierto, tramo uno: +20 L s<sup>-1</sup>.  
Figure 5. Open loop regulation, pool one: +20 L s<sup>-1</sup>.

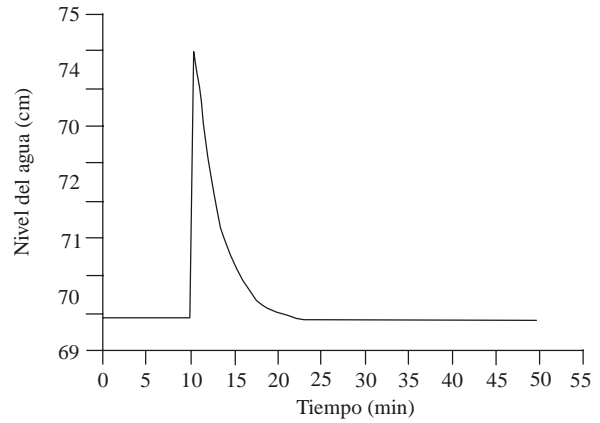


Figura 6. Regulación en lazo abierto, tramo uno: +40 L s<sup>-1</sup>.  
Figure 6. Closed loop regulation, pool one: +40 L s<sup>-1</sup>.

**Pruebas en lazo cerrado (controlador)**

Para su evaluación se realizan cambios no previstos en la demanda al final del canal de tipo escalón, de magnitudes ±20 (+20, +20, -20 y -20) y ±40 L s<sup>-1</sup> (+40, -40, -40 y +40). Los resultados se presentan en las Figuras 7 y 8.

**Seguimiento.** Consiste en introducir cambios tipo escalón de ±10 cm en el nivel de cada tramo, alrededor de su punto de operación. La Figura 9 muestra el resultado cuando se aplica al tramo uno.

**Parámetros de evaluación de los sistemas de control**

Con la finalidad de analizar los alcances o limitaciones de los sistemas de control, éstos son evaluados mediante criterios: de mejoras en la operación, y otros cuantitativos, técnicos y metodológicos (De León, 1986).

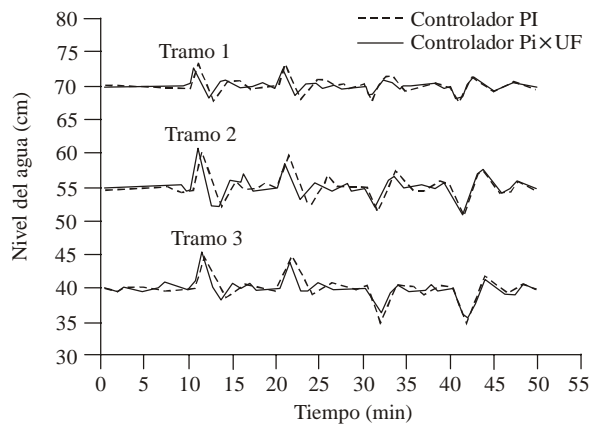


Figura 7. Regulación de perturbación imprevista (±20 L s<sup>-1</sup>).  
Figure 7. Regulation of step unknown perturbation (±20 L s<sup>-1</sup>).

**Closed loop tests (controller)**

For its evaluation, unforeseen step changes were made in the demand at the end of the canal, with magnitudes ± 20 (+20, +20, -20 and -20) and ± 40 L s<sup>-1</sup> (+40, -40, -40 and +40). Results are shown in figures 7 y 8.

**Level follow-up.** Consists in introducing ±10 cm step changes in the level of each pool around its operation point. Figure 9 shows the result when applied to pool one.

**Control systems evaluation parameters**

To analyze the performance or limitations of the control systems, they are evaluated using criteria: of improvements in operation, and others quantitative, technical and methodological (De León, 1986).

As for technical criteria, the PI x UF controller is better than the PI, regarding precision (error in stable state is

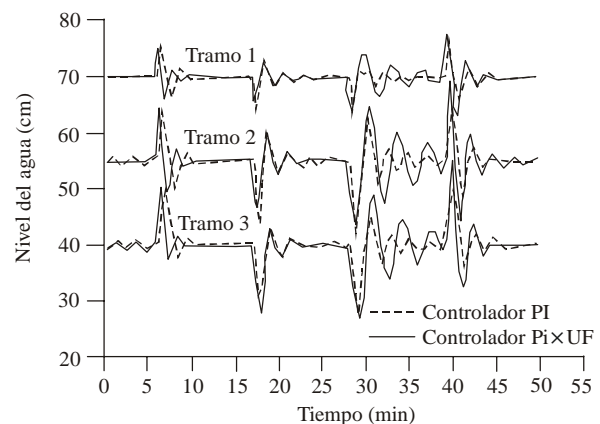


Figura 8. Regulación de perturbación imprevista (±40 L s<sup>-1</sup>).  
Figure 8. Regulation of step unknown perturbation (±40 L s<sup>-1</sup>).

En los criterios técnicos, se tiene que el controlador PI×UF con respecto al PI es mejor en precisión (el error en estado estable es 0.14% vs 0.19%), en estabilidad, considerándola como el máximo sobrepaso, (7.0 vs 8.3%), y en rapidez para alcanzar el estado estable, considerándola como la integral de la magnitud absoluta del error (1.1 vs 1.4%), con menor cantidad de movimiento (4.0% menos), cuando se regulan cambios de  $\pm 20 \text{ L s}^{-1}$ . Para cambios de  $\pm 40 \text{ L s}^{-1}$  el controlador PI×UF reguló mejor que el controlador PI sólo dentro del rango de la obtención de las constantes a y b (60 a 120  $\text{L s}^{-1}$ ) del factor universal. Para ello, los tres primeros cuantificadores mencionados incrementan sus diferencias entre ambos controladores; sus valores respectivos son: 0.06 y 0.12% en precisión, 15.5 y 22.2% en estabilidad, 1.4 y 1.6% en rapidez para regular, pero en contraste, el movimiento de compuerta es 50.0% mayor en el controlador PI×UF. En seguimiento el resultado de ambos controladores es muy similar.

En la parte operativa no es posible tener una distribución a demanda libre, debido a que el sistema es para control aguas arriba. Sin embargo, con el cálculo de la previsión del riego en tiempo real es posible reducir las intervenciones fuera del programa de riego; se reducen las pérdidas de agua y se optimiza la oportunidad de la entrega, pues las correcciones en lazo abierto y en lazo cerrado son adecuadas. Los algoritmos de control pueden ser aplicados de forma manual o automatizada, dependiendo del tiempo de respuesta de los canales y de las frecuencias de las perturbaciones.

Respecto al aspecto técnico, debido a las características rudimentarias del editor de lógica de escalera usado para programar la ley de control RST en los PLC, la implementación de los dos controladores probados fue tediosa, pero no difícil. La ley de control RST tiene una estructura simple, y requiere operaciones algebraicas sencillas. El uso de un editor más avanzado (con otro lenguaje) facilitaría la tarea.

En lo metodológico la diferencia radica en la obtención de los polinomios RST de la ley de control. En el algoritmo PI es tediosa porque se realiza mediante prueba y error, pero es robusto, ya que se origina de pruebas en lazo cerrado que toman en cuenta la dinámica de los componentes del sistema SCADA. En ubicación de polos es sencillo y sistemático pues su obtención se basa principalmente en dos modelos: 1) Lazo abierto  $P(q^{-1})$ , y 2) propuesto como un comportamiento deseado en lazo cerrado  $H_m(q^{-1})$ .

## CONCLUSIONES

La instrumentación de estructuras de control y la aplicación de sistemas de supervisión y control permite mejorar la operación de canales de riego. La metodología

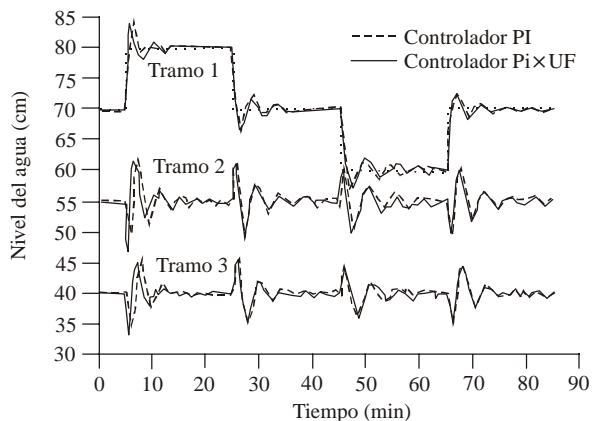


Figura 9. Seguimiento para nivel del tramo 1.

Figure 9. Level follow-up for pool 1.

0.14 % vs 0.19 %), stability, considered as the maximum overstep (7.0 vs 8.3%), and speed for reaching the stable state, considering it as the integral of the absolute magnitude of the error (1.1 % vs 1.4%), moving 4.0 % less when changes of  $\pm 20 \text{ L s}^{-1}$  are regulated. For changes of  $\pm 40 \text{ L s}^{-1}$  the PI×UF regulated better than the PI controller only within the range of obtention of the constants a and b (60 to 120  $\text{L s}^{-1}$ ) of the universal factor. For this purpose, the first three mentioned quantifiers increase their differences between both controllers; their respective values are: 0.06 and 0.12% in precision; 15.5 and 22.2% in stability, 1.4 y 1.6% in speed regulation, but, on the contrary, the floodgate movement is 50.0 % greater in the PI×UF controller. In level follow-up, the result of both controllers is very similar.

Regarding operations, it is not possible to achieve a demand free delivery, since the system is for upstream control. However, by calculating the irrigation forecast in real time, it is possible to reduce interventions outside the irrigation program; water losses are reduced and opportunity in delivery is optimized, since open and closed loop corrections are adequate. The control algorithms may be applied manually or automatically, depending on the response of the canals and of the frequency of the perturbations.

Regarding the technical aspect, due to the elementary characteristics of the stairway logic editor used to program the RST control law in the PLC, the implementation of the two tested controllers was tedious, though not difficult. The RST control law has a simple structure, and requires simple algebraic operations. The use of a more advanced editor (with another language) would facilitate the task.

As for methodology, the difference lies in the obtention of the RST polynomials of the control law. In algorithm PI, it is tedious, since it is done by trial and error, yet it is robust, due to the fact that it is originated

de regulación usada es sistemática, simple y fácilmente adaptable a la configuración física de la red de canales de los distritos de riego de México.

El controlador Proporcional e Integral modificado por el factor universal (PI×UF) es una buena opción para la regulación de canales. Se debe considerar la posibilidad de usar más de un factor de corrección por compuerta. Es recomendable estudiar algoritmos de control basados en modelos para facilitar la obtención de la ley de control. Para el de ubicación de polos se recomienda revisar la obtención de la función de transferencia del proceso en lazo abierto y, en la implementación, introducir un filtro para la medición de la variable a controlar.

### LITERATURA CITADA

- Brenes G., A., B. De León M., V. M. Ruiz C., y L. Rendón P. 2000. Sistema de control adaptable para la regulación de canales de riego. *Ing. Hid. en Méx.* 15(1): 63-72.
- Burt, C. M., R. S. Mills, R. D. Khalsa, and V. Ruiz. 1998. Improved Proportional Integral (PI) logic for canal automation. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE* 124(1):53-57.
- Clemmens, A. J. 1999. Canal automation potential for water delivery modernization. *In: 17 congress of International Commission on Irrig. and Drain.* Granada, España. pp: 87-97.
- De León M., B. 1986. Contribution à l'amélioration de la gestion des perimetres irrigues. Tesis de Doctorado. Universidad de Montpellier, Francia. pp:115-130.
- Franklin, G., J. Powell, and A. Emami-Naeini. 1995. *Feedback Control of Dinamic Systems.* 3<sup>rd</sup> Ed. Addison-Wesley, Massachusetts, USA. 778 p.
- Malaterre, P. O., D. C. Rogers, and J. Schuurmans. 1998. Classification of canal control algorithms. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE* 124(1):3-10.
- Ojeda B., W. y J. M. González C. 2000. *Spriter Ver. 2.1.* IMTA. Jiutepec, Morelos, México. 83 p.
- Rogers, D. C., and J. Goussard. 1998. Canal control algorithms currently in use. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE* 124(1):11-15.

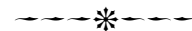
in closed loop tests, which take into account the dynamics of the components of the SCADA system. In pole placement, it is simple and systematic, since its obtention is based mainly on two models: 1) Open loop  $P(q^{-1})$ , and 2) proposed as a desired behavior in closed loop  $H_m(q^{-1})$ .

### CONCLUSIONS

The instrumentation of control structures and the application of supervision and control systems helps to improve the operation of irrigation canals. The regulation methodology used is systematic, simple and easily adaptable to the physical configuration of the network of canals in the irrigation districts in México.

The Proportional and Integral controller, modified by the universal factor (PI×UF), is a good option for canal regulation. The possibility of using more than one correction factor per floodgate must be considered. It is recommendable to study control algorithms based on models in order to obtain the control law more easily. For that of pole placement, it is recommended to check the obtaining of the transfer function of the process in open loop and, during implementation, to insert a filter for measuring the variable to be controlled.

—End of the English version—



- Ruiz C., V. M., A. Clemmens, and J. Shuurmans. 1998. Canal control algorithm formulations. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE* 124(1):31-39.
- USBR. (United States Bureau of Reclamation). 1995. *Canal systems automation manual.* Volume 1. Water Res. Denver, Col., USA.