

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Sistema de regulación de canales en el distrito de riego de la Begoña, Guanajuato.
<i>Autor / Adscripción</i>	Julián González Trinidad Universidad Autónoma de Zacatecas Benjamín de León Mojarro Víctor Manuel Carmona Ruiz Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Luis Rendón Pimentel Comisión Nacional del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 14(2): 11-20
<i>Fecha de publicación</i>	1999
<i>Resumen</i>	En esta investigación se propone un sistema de regulación de canales aplicable a las condiciones físicas y de organización de la operación del Canal Principal Margen Derecha (CPMD) del distrito de riego de La Begoña, Guanajuato. En el desarrollo del sistema de regulación se consideran criterios relativos a la infraestructura física, a los procedimientos actuales de operación y a las perspectivas de funcionamiento de la red principal de distribución de agua en el distrito. En general, se concluye que la metodología es extrapolable a otros distritos de riego.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1266

Sistema de regulación de canales en el distrito de riego de la Begoña, Guanajuato

Julián González Trinidad

Universidad Autónoma de Zacatecas

Benjamín de León Mojarro
Víctor Manuel Carmona Ruiz

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Luis Rendón Pimentel

Comisión Nacional del Agua

En esta investigación se propone un sistema de regulación de canales aplicable a las condiciones físicas y de organización de la operación del Canal Principal Margen Derecha (CPMD) del distrito de riego de La Begoña, Guanajuato. El CPMD se dividió en tres tramos de operación, los cuales fueron modelados mediante funciones de transferencia que permitiesen efectuar una regulación en lazo abierto con base en la demanda de riego, y una corrección en lazo cerrado del tipo proporcional-integral, tomando como referencia el nivel, aguas abajo de cada tramo. En el desarrollo del sistema de regulación se consideran criterios relativos a la infraestructura física, a los procedimientos actuales de operación y a las perspectivas de funcionamiento de la red principal de distribución de agua en el distrito. Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios respecto a precisión, rapidez y estabilidad, se recomienda continuar el análisis, incluyendo criterios de tipo operativo. En general, se concluye que la metodología es extrapolable a otros distritos de riego. En el caso de La Begoña constituye un apoyo para mejorar el manejo del agua de riego.

Palabras clave: función de transferencia, sistemas de regulación, canales de riego.

Introducción

Para mejorar el uso y manejo del agua en la red de conducción y distribución, se deben combinar algunos aspectos de los métodos de distribución y de las formas de regulación de canales, a fin de reducir las pérdidas de agua durante la operación.

En la presente investigación se propone un sistema de regulación de canales adaptables a las condiciones físicas y de organización de la operación de la red principal de conducción y distribución de agua del distrito de riego de la Begoña, Guanajuato.

Burt (1987) resume los propósitos de la automatización de canales en tres puntos: 1) asegurar que el suministro de agua llegue a los agricultores en el tiempo y la cantidad adecuados; 2) asegurar un sistema flexi-

ble de entrega de agua; 3) reducir las restricciones a los agricultores para alcanzar una alta eficiencia de riego.

La regulación de canales consiste en establecer la conducción y la distribución del agua de riego de acuerdo con la variación espacial y temporal de las necesidades de los cultivos. De esta manera, la regulación está relacionada con el método o forma de distribución y con el método de riego en la parcela.

En los últimos años han aparecido métodos hidromecánicos y electromecánicos de regulación que presentan combinaciones de las regulaciones aguas arriba y aguas abajo, las cuales permiten establecer un equilibrio entre las ventajas e inconvenientes de unos y otros. Muchos de ellos utilizan la teletransmisión eléctrica y la hertziana para transmitir información, que son más rápidas que la transmisión hidráulica (De León, 1986).

Algunos métodos nuevos de regulación se han desarrollado como trabajos de investigación en instituciones de Estados Unidos (Burt, 1983; Zimbelman y Bedworth 1983; Buyalski, 1979; Clemmens *et al.*, 1995); de Francia (Clement, 1974; Coeuret, 1977; Goussard, 1993; Kosuth, 1994; Malaterre, 1994), y de México (De León, 1989, Ruiz, 1987a), entre otros. En todos los casos la metodología propuesta se ha desarrollado para aplicarse en entornos muy particulares, limitando su extrapolación, por lo que no existe una metodología general.

La diversidad en cuanto a los procedimientos de regulación se debe a dos causas principales: primero, el estudio de la regulación de los canales de riego requiere de simuladores del flujo transitorio capaces de representar las características físicas y las condiciones de funcionamiento hidráulico de sistemas complejos que no siempre están disponibles; segundo, las ecuaciones que rigen el fenómeno de propagación de los caudales no son lineales, lo cual limita la aplicación de teorías de control de sistemas lineales.

Las variables susceptibles de ser reguladas son el tirante, el volumen y el caudal; en cada caso se requiere de una modelación específica del sistema, de información particular y de equipo de medición especial.

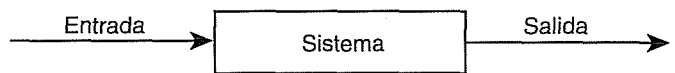
Materiales y métodos

Características del sistema a regular

El distrito de riego de La Begoña está formado por la cuenca del río Laja, la presa de almacenamiento Ignacio Allende, las presas derivadoras Soria y Guadalupe, una red de canales de conducción y distribución y 10,822 ha de riego que detentan 2,144 usuarios. La red de conducción y distribución tiene como eje principal el Canal Principal Margen Derecha (CPMD), el cual cuenta con 28 represas ubicadas a lo largo de los 19.970 km de longitud. Sobre el CPMD se ubican 84 puntos de extracción, de los cuales 20 corresponden a canales laterales y los restantes a tomas directas. El CPMD presenta 11 secciones hidráulicas trapeciales de diferentes dimensiones, revestidas con mampostería. Las represas ubicadas sobre el CPMD se componen de una a tres compuertas de tipo radial o deslizante. El caudal de diseño es de $10.15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ al inicio del canal, y se reduce a $0.20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el extremo final.

La distribución del agua en el distrito obedece a la demanda semanal y a la regulación de las estructuras de control aguas arriba. En estas estructuras se mantiene constante un tirante máximo para abastecer los canales laterales y las tomas directas. El CPMD es operado por cuatro supervisores, cada uno de los cua-

1. Relación entrada-salida



les atiende un determinado tramo de canal. Los supervisores ajustan los movimientos de las compuertas en relación con el caudal que les proporciona el supervisor situado aguas arriba. La cantidad de agua entregada a cada uno de los usuarios se cuantifica bajo el término de "riego". Un riego es de aproximadamente $0.100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

El CPMD se compone de 28 tramos de canal dividido por compuertas de regulación accionadas manualmente. La función de éstos consiste en crear y mantener almacenamientos en los tramos de canal para alimentar las extracciones laterales. Los tramos de canal conectados en serie y la forma de operar cada uno sugiere representaciones particulares mediante esquemas funcionales.

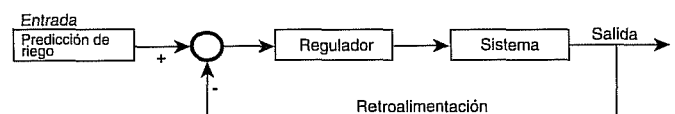
Representación del CPMD

En la teoría de control de sistemas, la unidad elemental de análisis se representa en la ilustración 1.

El problema del control de un sistema consiste en determinar el valor de la entrada para obtener un valor de la salida próxima de un valor de referencia. Para resolver este problema se usan funciones que relacionan la entrada y la salida denominadas Funciones de Transferencia (FT). La unidad elemental que describe la operación de un sistema de canales de riego puede representarse mediante un sistema de control en lazo cerrado (ilustración 2). El regulador modifica las condiciones de operación del canal, de tal forma que la salida permita satisfacer la demanda de riego.

En la ilustración 2 se muestra el esquema general del algoritmo de regulación para un tramo del CPMD, el cual consta de varias fases interdependientes dentro de las cuales se puede distinguir tres módulos fundamentales: 1) la predicción de necesidades de riego; 2) la propagación de caudales y el comportamiento hidráulico en el canal de conducción (sistema), y 3) el diseño del corrector.

2. Esquema de regulación para un tramo del CPMD



La predicción de las necesidades de riego se basó en el programa semanal que se elabora en el distrito de riego de La Begoña.

En la operación de canales, el régimen de funcionamiento hidráulico que predomina es el transitorio gradualmente variado. Para evaluar el comportamiento dinámico presente en los canales se utilizaron las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales expresan los principios de la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Debido a la naturaleza no lineal de estas ecuaciones, se recurre a modelos simplificados que permiten una representación adecuada del funcionamiento del canal y pueden usarse en la síntesis de algoritmos de regulación, basados en la teoría de control para sistemas lineales.

Para tramos cortos de canal se aproximó la dinámica de los fenómenos hidráulicos con modelos lineales de primer orden. Al respecto, la ecuación diferencial que representa un modelo lineal de primer orden es:

$$KQe(t - \tau) = Qs(t) + T \frac{dQs(t)}{dt} + Qb \quad (1)$$

donde:

- $Qe(t)$ = caudal de entrada;
- $Qs(t)$ = caudal de salida;
- t = tiempo;
- K = parámetro constante;
- T = constante positiva;
- τ = retardo;
- Qb = caudal base;

El estudio de las propiedades de los sistemas lineales se efectúa a partir de la función de transferencia, la cual requiere del uso de la transformada de Laplace de la ecuación (1):

$$\frac{Qs(p)}{Qe(p)} = \frac{K e^{-\tau p}}{1 + TP} + \frac{Qb}{P} \quad (2)$$

donde P es la variable independiente en el espacio de Laplace.

Para obtener los parámetros del modelo de primer orden que aproxima el comportamiento dinámico presente en el canal, se usaron los datos obtenidos con el modelo de simulación SIC (*Simulation of Irrigation Canals*) adaptado a la geometría y calibrado con las características hidráulicas de cada tramo de canal. Los datos para cada tramo de canal se obtuvieron independientemente. Las condiciones de operación analizadas fueron las reportadas en el ciclo otoño-invierno 1995. Los parámetros T , K , y τ se obtuvieron en forma

gráfica, a partir de la respuesta al escalón (incremento de caudal) obtenida mediante simulación.

El procedimiento consistió en estimular cada tramo de canal con un cambio de tipo escalón de caudal aguas arriba al inicio del tramo, y en evaluar el caudal de salida en el extremo final.

En el caso del primer tramo comprendido entre la presa derivadora de Soria (km 0 + 000) y la represa (km 1 + 580), se estableció a partir de un gasto base $Qb = 5.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ que se cambió a $7.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, el cual se mantuvo durante 3.5 horas para luego establecerse de nuevo el gasto base.

De la gráfica construida con estos datos se obtienen los parámetros K , T y τ directamente. El retardo (τ) es de 383 segundos; la constante de tiempo (T) se obtiene cuando la salida alcanza el 66% del gasto de entrada, que para este primer tramo fue de 1,680 segundos, y la constante K , que corresponde al incremento del caudal introducido, es de $1.20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

El modelo de primer orden para el primer tramo es:

$$\frac{Qs(p)}{Qe(p)} = \frac{1.2 e^{-383.8p}}{1 + 1680 P} + \frac{5.9}{P} \quad (3)$$

Este procedimiento de identificación se desarrolló en los 28 tramos del CPMD, encontrándose que los modelos reproducen el comportamiento dinámico de cada tramo.

Cuando la longitud de los tramos de canal aumenta debido a condiciones propias de la operación (compuertas totalmente abiertas), los modelos de primer orden son insuficientes para representar la propagación de caudales. El CPMD se divide para su operación en cuatro tramos que varían de 2,840 a 7,400 m. En tales casos, para determinar modelos más adecuados, Ruiz (1987a) propone estimular cada tramo de canal con señales ricas en frecuencia y, a partir de los datos obtenidos, identificar los modelos que mejor representen el comportamiento del tramo de canal.

Para obtener información sobre la dinámica de la propagación del gasto, se añadió al gasto base, en un punto de operación, una señal binaria de longitud 2^4 , la cual es una señal pseudo-aleatoria que toma valores de ± 1 a intervalos finitos de tiempo, con una probabilidad de 0.5 y media cero. Esta señal determinística, usada en identificación paramétrica, permite excitar el sistema de tal manera que se hace posible observar la dinámica del proceso alrededor de un punto de operación.

En forma similar a lo expuesto en párrafos anteriores, a partir de un punto de operación se sumó al caudal base la señal binaria, para cada uno de los tres tramos de operación del CPMD. El comportamiento dinámico del canal durante las pruebas realizadas se obtuvo usando el simulador SIC.

Identificación de los parámetros del modelo

La identificación de los parámetros de las funciones de transferencia consiste en, dado un modelo

$$\frac{Qs(q^{-1})}{Qe(q^{-1})} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m}}{a_0 + a_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}} \quad (4)$$

donde:

- a_m y b_n = parámetros a identificar;
- m y n = grados de los polinomios;
- q^{-1} = operador retardo;
- $q^{-1} x(k) = x(k-1)$,

determinar el orden y los coeficientes de los polinomios $A(q)$ y $B(q)$ que mejor aproximan el comportamiento dinámico presente entre la entrada y la salida seleccionadas para cada tramo de canal.

Los parámetros de los modelos fueron identificados usando el algoritmo de mínimo cuadrados.

Después de analizar el comportamiento dinámico de cada tramo de canal en lazo abierto y cerrado, el periodo de muestreo seleccionado fue de 12 minutos. A partir de diferentes pruebas con el programa de identificación, se seleccionaron el orden de los polinomios y el retardo. Las entradas de este programa son: caudales y tirantes simulados, el orden de los polinomios A y B, el retardo (τ) y el tipo de filtro, el cual permite eliminar los componentes de alta frecuencia que no interesa identificar.

Los modelos se obtuvieron en términos de variables relativas donde la variable relativa es la diferencia entre la variable y su valor en el punto de operación del que se partió. Lo anterior facilita la tarea de identificación de los parámetros y el orden de los polinomios del modelo propuesto en la ecuación 4. Así, los modelos obtenidos para caudal relativo y tirante relativo, en el tramo de operación 1 (Soria a 5 + 580), son:

Caudal:

$$\frac{\Delta Qs(q^{-1})}{\Delta Qe(q^{-1})} = \frac{0.17282}{1 - 0.82690 q^{-1}} q^{-3} \quad (5)$$

Tirante:

$$\frac{\Delta Zs(q^{-1})}{\Delta Qe(q^{-1})} = \frac{0.14819 + 0.04758 q^{-1}}{1 - 1.38616 q^{-1} + 0.50428 q^{-2}} q^{-4} \quad (6)$$

donde:

- $\Delta Qs(q^{-1})$ = caudal relativo de salida m^3s^{-1} , caudal aguas abajo al final del tramo;
- $\Delta Qe(q^{-1})$ = caudal relativo de entrada m^3s^{-1} , caudal aguas arriba al inicio del tramo;

$\Delta Zs(q^{-1})$ = tirante relativo de salida m, tirante aguas abajo al final del tramo;

q^{-1} = operador retardo, $q^{-1} x(k) = x(k-1)$.

Diseño del corrector

El corrector o regulador propuesto está formado por dos componentes. La primera componente la forma un regulador en lazo abierto de la demanda de riego. El regulador, usando las funciones de transferencia obtenidas anteriormente, determina el cambio en gasto que se debe introducir aguas arriba de cada tramo, para satisfacer los cambios en la demanda de riego solicitado aguas abajo del mismo. El regulador en lazo abierto usa el inverso del modelo; conociendo la demanda (salida), determina el gasto a introducir aguas arriba (entrada). La segunda componente del sistema de regulación la constituye una regulación en lazo cerrado, cuya función es corregir los errores entre la salida medida y el tirante aguas abajo al final del tramo, así como proporcionar un valor de referencia.

Las extracciones para canales laterales en el CPMD se sitúan inmediatamente aguas arriba de cada represa, por lo que así mismo se requiere de niveles constantes aguas arriba de las compuertas, para abastecer los caudales de extracción lateral y los caudales requeridos aguas abajo. Por lo anterior, la variable a controlar será el tirante al final de cada tramo. De esta manera, un esquema general de regulación para cada tramo de operación del CPMD puede ser el que se muestra en la ilustración 3.

En este esquema:

Z_{ref} = tirante de referencia aguas abajo de cada tramo;

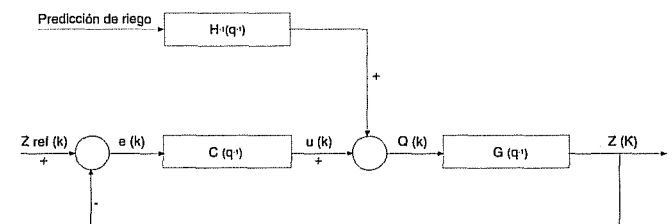
Z = tirante medido aguas abajo del tramo;

$G(q)$ = función de transferencia del sistema para el tirante (ecuación 6);

$H(q)$ = función de transferencia del sistema para el caudal (ecuación 5);

$C(q)$ = función de transferencia del corrector.

3. Esquema general de regulación de cada tramo de operación del CPMD



Como se observa en la ilustración 3, la regulación es doble en cada tramo: una, en lazo abierto, corrige en función de la previsión de necesidades de riego y otra, en lazo cerrado, corrige las diferencias del tirante (Z) respecto al tirante de referencia (Z_{ref}) en cada tramo de operación del CPMD. Una expresión general del corrector $C(q^{-1})$ es:

$$C(q^{-1}) = \frac{S(q^{-1})}{R(q^{-1})} = \frac{s_0 + s_1 q^{-1} + \dots + s_n q^{-ns}}{r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_m q^{-m}} \quad (7)$$

para el primer tramo de operación del CPMD. Las funciones de transferencia para los módulos de predicción y de representación hidráulica corresponden a la ecuación 5 para el caudal, y a la 6 para el tirante, respectivamente.

Elección del corrector

El corrector se determina de tal forma que el sistema en lazo cerrado sea estable y los polos sean lo suficientemente rápidos y amortiguados para tener un comportamiento adecuado. En este trabajo se usó el regulador proporcional, integral y derivativo (PID) que impuso al sistema de regulación un comportamiento de segundo orden, el cual se presenta entre la señal de error $e(t)$ y la señal de control $U(t)$ igual a:

$$U(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

donde:

$e(t)$ = error entre la salida y la referencia;
 K_p , T_i y T_d = parámetros de diseño del controlador, constante proporcional, tiempo de integración y tiempo de derivación respectivamente.

Para obtener una primera aproximación de los parámetros de diseño del controlado (K_p , T_i , T_d) se usó el método propuesto por Ziegler-Nichols (Franklin *et al*, 1990). Para aplicar este método se requiere de hacer pruebas con el sistema a controlar. Una de ellas, realizada en simulación, consiste en evaluar la respuesta transitoria del sistema estimulado con un escalón.

El regulador PID puede escribirse en forma recursiva o de velocidad como (Isermann, 1981):

$$U(k) = U(k-1) + \alpha_0 e(k-1) + \alpha_1 e(k-1) + \alpha_2 e(k-2) \quad (9)$$

donde:

$$\alpha_0 = K_p \left[1 + \frac{T_0}{2T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right] \quad (10)$$

$$\alpha_1 = -K_p \left[\frac{1 + 2T_d}{T_0} - \frac{T_0}{2T_i} \right] \quad (11)$$

$$\alpha_2 = K_p \frac{T_d}{T_0} \quad (12)$$

donde:

T_0 = periodo de muestreo;

T_i = tiempo de integración;

T_d = tiempo de derivación;

k = índice temporal que viene de la discretización de la ecuación 8.

Los canales de riego son sistemas que presentan fuertes retardos en la transmisión de caudales, por lo que generalmente el término derivativo del regulador PID no se utiliza.

Con el objeto de estabilizar el sistema, se propusieron diferentes valores de los parámetros K_p y T_i , donde T_i es propuesto y K_p se determina mediante el método de lugar de las raíces (Root-locus). Este método es un procedimiento clásico en el diseño de reguladores; consiste en fijar la posición deseada de los polos de la función de transferencia en lazo cerrado, modificando el parámetro del regulador K_p .

El método Root-Locus permite seleccionar la constante K_p del regulador $C(q^{-1}) = K_p \frac{S(q^{-1})}{R(q^{-1})}$, que ubica los polos del sistema en lazo cerrado; es decir, los ceros de la ecuación característica (13) en la posición deseada (dentro del círculo unitario):

$$R(q^{-1})A(q^{-1}) + K_p S(q^{-1})B(q^{-1}) \quad (13)$$

Para valores de $K_p = 1.5$ y $T_i = 3600$, la función de transferencia en lazo abierto que relaciona el nivel de salida ($Z(k)$) con el error ($e(k)$) es:

$$\frac{Z(k)}{e(k)} = \frac{q^{-3}(1.001 - 0.998q^{-1})(0.1482 + 0.4758q^{-1})}{(1 - 1.3862q^{-1} + 0.50428q^{-2})(1 - q^{-1})} \quad (14)$$

Con objeto de modificar los ceros de la función de transferencia en lazo cerrado se introduce el parámetro K_p :

$$\frac{Z(k)}{Z_{ref}(k)} = \frac{K_p G(q^{-1}) C(q^{-1})}{1 + K_p G(q^{-1}) C(q^{-1})} \quad (15)$$

La combinación de las ecuaciones 5, 6 y 15 permite obtener la función de transferencia en lazo cerrado (ilustración 3):

$$\frac{Z(k)}{Z_{ref}(k)} = \frac{q^{-3}0.5(1.001-0.999q^{-1})(0.14819+0.47589q^{-1})}{1-2.386q^{-1}+1.890q^{-2}-0.430q^{-3}-0.050q^{-4}-0.0238q^{-5}} \quad (16)$$

De esta última ecuación se obtienen los polos y los ceros de la función de transferencia del sistema en lazo cerrado, para lo cual es necesario escribir la ecuación 16 en términos del operador adelanto "q" ($q x(k) = x(k+1)$):

$$\frac{Z(k)}{Z_{ref}(k)} = \frac{0.0741(q-0.998)(q+0.3211)}{[(q-0.7777)^2+0.3610^2](q-0.9999)[(q+0.0846)^2+0.1587^2]} \quad (17)$$

Las raíces del denominador de la ecuación 17 se sitúan dentro del círculo unitario, mostrando que el sistema es estable para los parámetros propuestos.

Aplicación del sistema de regulación en la operación del CPMD

Para probar las bondades del sistema de regulación diseñado, se probó la reacción del mismo en dos tipos de acciones que se presentan frecuentemente en la operación del CPMD. Estas acciones corresponden, por una parte, a la intervención no prevista por parte de los agricultores cuando maniobran las tomas laterales para aumentar o disminuir el caudal de alimentación hacia sus parcelas; por otra parte, a intervenciones programadas de apertura o cierre de compuerta que deberán hacer los responsables del manejo del canal. En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos para el primer tramo de operación del CPMD.

Resultados y discusión

Tramo de operación derivadora Soria - km 5 + 520

Con base en la operación de este tramo de canal y en una recomendación de los responsables de su operación, únicamente las compuertas km 5 + 520 y la derivadora Soria quedarían bajo control automático (operadas a distancia sin intervención manual), mientras que las tres compuertas intermedias continuarían siendo operadas manualmente. Sobre este tramo se parte de un régimen normal de distribución de agua que se esquematiza en la ilustración 4, donde la regulación en la derivadora Soria permite mantener un nivel constante aguas arriba de la compuerta km 5 + 520, ya que de este valor depende la alimentación de la parte situada aguas abajo del canal.

La corrección a una "perturbación prevista" corresponde a una regulación en lazo abierto, en la cual se debe estimar el caudal de entrada en función del caudal de salida (demanda de riego).

Esto implica una inversión del modelo del flujo del tramo de canal estudiado, cuya recuperación de energía presenta un problema de difícil solución en lo general. Sin embargo, el modelar mediante funciones de transferencia facilita este proceso.

La función $H(q)$ para el tramo Soria - km 5 +520 es:

$$H(q^{-1}) = \frac{\Delta Qs(q^{-1})}{\Delta Qe(q^{-1})} = \frac{0.173}{(1-0.87q^{-1})} q^{-4} \quad (18)$$

A un instante k , el caudal de entrada en Soria en función del futuro de la perturbación prevista en la extracción del km 5 + 520. De la ecuación 18 se tiene :

$$\Delta Qe(k) = \frac{\Delta(Qs)(K+4) - 0.827\Delta Qs(K-3)}{0.173} \quad (19)$$

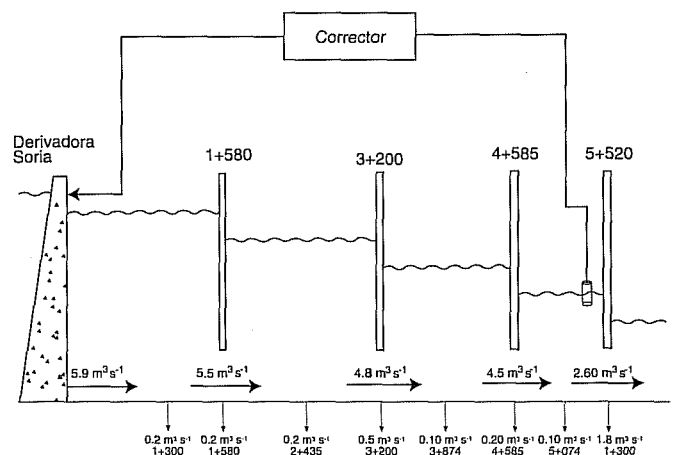
Para evaluar la corrección a una perturbación prevista, se considera un incremento en la extracción del km 5 + 520, en el cual a los 100 minutos se pasa de $1.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $2.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Esto implica que sobre el canal principal, en el km 5 + 520, debe circular un caudal previsto de $4.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ sobre un caudal normal de $4.4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, igual a $1.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ del canal lateral del km 5 + 520 más $2.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, que continúa sobre el canal principal.

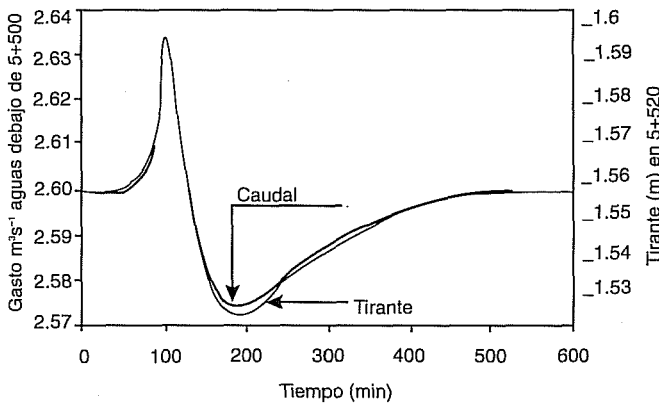
Sustituyendo estos valores en la ecuación 19, se obtiene el valor de la corrección en lazo abierto en la presa derivadora Soria.

$$Qe(k) = 6.24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$

4. Tramo de operación del CPMD (Soria - km 5 + 520)



5. Variación del gasto y el nivel en el km 5 + 520 para una perturbación prevista en el lateral del km 5 + 520



En la ilustración 5 se muestra que a los 100 minutos el nivel del agua que fluye aguas arriba de la compuerta 5 + 520 alcanza como valor máximo 1.59 m, mientras que el caudal en la misma compuerta alcanza el valor máximo de 2.65 m³s⁻¹. Esto puede explicarse debido a que el retardo es sólo una aproximación del tiempo que le toma al agua recorrer el tramo de canal. Este tiempo puede ser un poco mayor o menor; en este caso fue menor. La corrección llegó antes de presentarse la perturbación prevista.

En la ilustración 5 también se observa que iniciado el incremento en la extracción, el nivel sobre el canal principal disminuye hasta presentar un mínimo de 1.53 m a los 200 minutos, recuperándose a partir de este tiempo hasta alcanzar el valor de referencia (1.55 m). Igualmente, se observa que el caudal alcanza un valor mínimo de 2.57 m³s⁻¹ y posteriormente regresa al valor requerido 2.6 m³s⁻¹. Estas variaciones se deben a la extracción lateral.

En este caso, debe observarse que las variaciones en tirante fueron muy pequeñas (inferiores a ± 5 cm), por lo que no se hizo necesario incluir la corrección en el lazo cerrado.

Perturbación no prevista

Como se observa en la ilustración 4, las perturbaciones no previstas pueden producirse en diferentes puntos sobre el tramo Soria – km 5 + 520, ya que los agricultores pueden interrumpir o modificar el riego en cualquiera de los puntos de extracción.

Estas perturbaciones se traducen en variaciones del nivel aguas arriba de la compuerta situada en el km 5 + 520 del CPMD, lo que hace necesaria una regulación en lazo cerrado para restablecer el nivel cercano al valor de referencia.

El corrector del nivel es del tipo *PI*, y los coeficientes pueden tomar valores entre 0.05 a 1.5 manteniendo las raíces de la función de transferencia del canal en lazo cerrado dentro del círculo unitario.

Con el propósito de evaluar el efecto de la ubicación de la perturbación y de la elección de los parámetros del corrector en el tramo del canal, respecto a sus características esenciales (rapidez, precisión y estabilidad), se simularon dos perturbaciones, situadas, una en el km 5 + 520, y otra en el km 3 + 200 del CPMD.

Perturbación en el km 5+520

Es importante considerar una perturbación en el km 5+520 del CPMD, ya que en este punto se debe mantener un tirante constante $Z_{ref} = 1.55$ m (nivel de referencia). Por lo tanto, es en este sitio donde se localizaría un sensor que registrase el nivel real a cada instante de muestreo.

Para simular esta perturbación, se consideró un incremento en la extracción del lateral del km 5+520, en la cual a los 30 minutos se pasa de 1.8 m³s⁻¹ a 2.1 m³s⁻¹, regresándose a los 90 minutos a la extracción de referencia (1.8 m³s⁻¹).

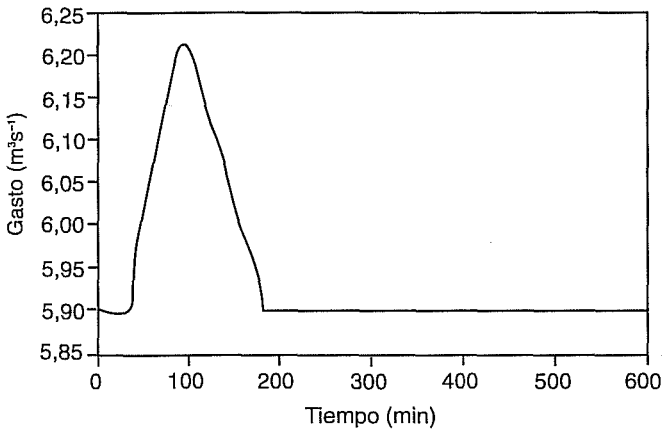
La posición del nivel de referencia se establece para abastecer el caudal de 2.6 m³s⁻¹, el que circula aguas abajo sobre el CPMD al igual que el caudal de 1.8 m³s⁻¹, sobre el lateral del km 5 + 520. El control se hace sobre la compuerta de la derivadora Soria, en función de la diferencia entre el nivel y la referencia en el km 5+520. Esta acción se realiza para diferentes valores de los parámetros K_p y K_i , para los cuales el sistema se establece en lazo cerrado. En el Cuadro 1 se presentan las variaciones máximas del tirante y del gasto para distintos valores de K_p y K_i .

De este Cuadro se obtiene que los valores que minimizan la variación del caudal y del tirante son: $K_p = 1.5$ y $K_i = 0.05$.

1. Variación máxima del tirante y del gasto para distintos parámetros K_p y K_i

Parámetros		Soria		5 + 520	
		ΔQ (m³s⁻¹)		ΔZ (m)	ΔQ (m³s⁻¹)
K_p	K_i				
1.5	0.50	0.600	0.300	0.230	
1.5	1.00	0.980	0.440	0.320	
1.0	1.50	1.450	0.630	0.480	
1.5	0.05	0.310	0.100	0.070	

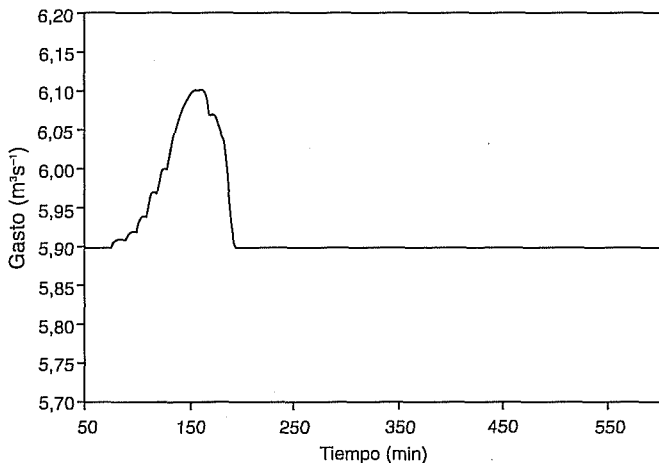
6. Variación del gasto en Soria para una perturbación no prevista en el lateral del km 5+520 con $K_p = 1.5$ y $K_i = 0.05$



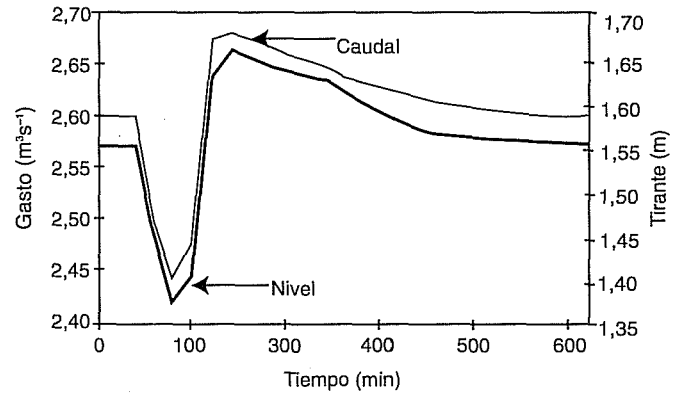
En la ilustración 6 se muestra la acción del corrector en la derivadora Soria para $K_p = 1.5$ y $K_i = 0.05$. En la ilustración 7 se presenta la variación del caudal y del tirante en el km 5+520 para los mismos valores de K_p y K_i .

En la 6 se observa que la corrección en lazo cerrado comienza a los 9 minutos después de iniciada la perturbación, registrándose un incremento de caudal en la presa derivadora Soria de $6.21 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a los 51 minutos y regresando al valor de referencia ($5.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) a los 151 minutos. En la 7 se muestra que a los 95 minutos el nivel aguas arriba de la compuerta del km 5+520 alcanza un valor mínimo de 1.39 m , mientras que el caudal alcanza su valor mínimo de $2.44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Estas variaciones se deben al efecto de la extracción lateral. Asimismo, se observa un incremento del tirante de

8. Variación del caudal en Soria para una perturbación no prevista en el km 3+200 con $K_p = 1.5$ y $K_i = 0.05$



7. Variación del caudal y el nivel en el km 5+520 para una perturbación no prevista en el lateral del km 5+520 con valores de $K_p = 1.5$ y $K_i = 0.05$



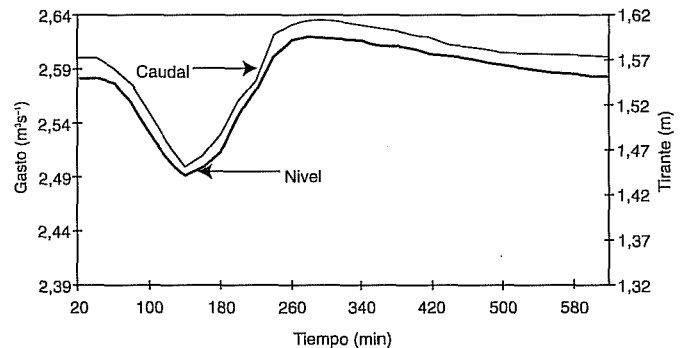
1.65 m y, en el caudal que continúan por el CPMD, el cual es de $2.68 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Estas variaciones se deben al efecto de la corrección en el caudal de la presa derivadora Soria.

Perturbación en el km 3 + 200

Para comprobar si hay algún efecto debido a una extracción existente en un punto intermedio, se simuló una perturbación no prevista en el primer tramo del CPMD, a la altura del km 3 + 200, incrementando el gasto de $0.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $0.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante 90 minutos, comenzando a los 30 minutos. En las ilustraciones 8 y 9 se muestran los resultados obtenidos en esta prueba.

En la ilustración 8 se observa que la corrección en la derivadora Soria comienza 20 minutos después de iniciada la perturbación. El máximo incremento se registró a los 130 minutos y fue de $6.10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, regresando al valor de referencia ($5.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) a los 195 minutos.

9. Variación del nivel y del caudal en el km 5+520 para una perturbación no prevista en el km 3+200 con $K_p = 1.5$ y $K_i = 0.05$



En la ilustración 9 se muestra que a los 130 minutos el nivel aguas arriba de la compuerta del km 5 + 520 alcanza un valor mínimo de 1.44 m, mientras que el caudal que continúa por el CPMD desciende a 2.50 m³s⁻¹. Estas variaciones se deben a la extracción efectuada en el km 3 + 200.

Comparando las ilustraciones 6 y 7 con las 8 y 9 se observa la influencia de la del lugar de la perturbación, cuya posición respecto a la fuente de abastecimiento tiene gran importancia debido a los tiempos que tarda el sensor en detectar esa perturbación.

Al comparar la variación del nivel del agua cuando se introduce la perturbación en el km 5+520 y en el km 3+200 existe una variación del tirante de ± 5 cm entre un punto y otro, presentándose una mayor variación cuando la perturbación es en el km 5+520; igualmente, se observa que el gasto que debe circular por el CPMD presenta una variación de ± 0.05 m³s⁻¹. Estas diferencias se deben al retardo propio de los sistemas hidráulicos y a que la perturbación introducida en el km 3+200 se amortigua por los cambios de volumen que hay en el canal antes de ser detectada aquélla en el km 5 +520.

Conclusiones

En general, la metodología utilizada es sistemática y puede exportarse a canales de otros distritos de riego con características diferentes.

La corrección al sistema de control más importante es la efectuada en lazo abierto, en función de la previsión de necesidades de riego, lo cual permite mejorar el tiempo de respuesta de la corrección en lazo cerrado.

El esquema de control de cada tramo de operación del CPMD, adoptado en función de restricciones económicas y de recomendaciones de los responsables de la operación del distrito, conduce a un sistema híbrido (control automático-control manual), cuya implantación requeriría de protocolos de transmisión de información sobre el estado de las compuertas manuales al sistema automático.

Aunque los modelos dinámicos encontrados para describir el comportamiento entre la entrada y la salida de cada tramo de canal son adecuados, se deberán explorar teorías de control adaptable que tomen en cuenta, a través de la identificación de parámetros, diferentes puntos de funcionamiento hidráulico de los canales.

Recibido: 14/07/98
Aprobado: 06/10/98

Referencias

- Burt, C. 1983. *Regulation of sloping canal by automatic downstream control*. Tesis de doctorado. Utah: Utah State University Logan. 113 p.
- Burt, C. 1987. *Delivery system schedules and capacities. Planning, Operation, Rehabilitation and Automation of Irrigation Water Delivery Systems*. New York: ASCE. pp: 120-132.
- Buyalsky, J. 1979. *Automatic upstream control system for canals*. Denver, Colorado: Engineering and Research Unit, Bureau of Reclamation. 35 p.
- Clement, J. 1974. *Exploitation par ordinateur d'un réseau hydraulique*. Francia: Société Hydrotechnique de France. 25 p.
- Clemmens A. J., T. S. Strelkoff y R. S. Gooch. 1995. Dimensionless characterization of canal pools. En: *1st International Conference on Water Resources Engineering, Irrigation & Drainage*. San Antonio, Texas. EUA.
- Coeuret, Ch. 1977. Stabilité et précision de la régulation dynamique. *La Houille Blanche*. No. 2/3. 15 p.
- De León, M. B. 1986. Sistematización de la regulación de canales en los distritos de riego. En: *III Congreso Nacional de Irrigación*. Los Mochis, Sin., México. pp: 320-327.
- De León, M. B. 1989. El volumen como variable de regulación en una red de canales de riego. En: *IV Congreso Nacional de Irrigación*, Cd. Reynosa, Tam., México. pp: 130-135.
- Franklin, G. F., J. D. Powell y M. L. Workman. 1990. *Digital control of dynamic systems*. New York: Addison Wesley. 250 p.
- Goussard, J. 1993. *L'automatisation des réseaux d'irrigation en canaux*. ICID-CIID, Indi.
- Isermann, R. 1981. *System identification*. Presentación magistral del 5to Simposio de IFAC sobre Identificación y Estimación de Parámetros. Darmstadt, Septiembre 1979. Oxford: Pergamon Press. 350 p.
- Kosuth, P. 1994. *Techniques de régulation automatique des systèmes complexes: application aux systèmes*. Francia: CEMAGREF.
- Meleterre, P.O. 1994. *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation*. Tesis de doctorado. Francia: ENGREF.
- Ruiz C., V. M. 1987a. *Control predictivo de un canal de riego*. Tesis de maestría. México: DEPEI-UNAM.
- Ruiz C., V. M. 1987b. *Control predictivo de una columna de absorción*. México: Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 55 p.
- Zimbelman, D. D. y D. D. Bedworth. 1983. Computer control for irrigation canal system. *ASCE J. Irrig. and Drain. Engrg.* 109(1):43-59.

Abstract

González, J; B. de León; V. M. Carmona & L. Rendón "Canal control system in the Begoña irrigation district, Guanajuato". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XIV. Num. 2, pages 11-20. May-August, 1999.

This research proposes a canal control system applicable to the physical and organizational conditions of the Right Bank Main Canal in La Begoña Irrigation District, Guanajuato. The Right Bank Main Canal (CPMD) was divided in three operation pools. The dynamics of each pool were modeled using transfer functions to develop an open loop regulator that considers user demands and a closed loop proportional-integral regulator that holds the downstream water level at the end of the pool at the reference profile. The control system design considers criteria related to the physical infrastructure, the current operation procedures, and the functional perspectives of the main distribution network. Although precision, rapidity and stability of the regulator-canal system are quite satisfactory, the analysis should be continued to include operational criteria. The proposed methodology is applicable to other irrigation districts; in La Begoña irrigation district the proposal improves conveyance and distribution.

Key words: Transfer function, regulation system, irrigation canals.

Dirección institucional de autores:

Julián González Trinidad

Universidad Autónoma de Zacatecas
López Velarde s/n, Zacatecas, Zacatecas
Tel. (492) 2 05 47 ext. 21

Benjamín de León Mojarro
Víctor Manuel Carmona Ruiz

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532 Col. Progreso Jiutepec, Mor
CP. 62550
Tel. (73) 19 40 41

Luis Rendón Pimentel

Comisión Nacional del Agua
Antonio Caso No. 19, piso 4
Col. Tabacalera
CP. 06030
Tel. (5) 663 22 08 y 663 22 09