

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Sistema de control adaptable para la regulación de canales de riego.
<i>Autor / Adscripción</i>	Alfonso Brenes Gámez SEDENA, Costa Rica Benjamín de León Mojarro Víctor Manuel Ruiz Carmona Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Luis Rendón Pimentel Comisión Nacional del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 15(1): 63-72
<i>Fecha de publicación</i>	2000
<i>Resumen</i>	Con el propósito de mejorar el servicio de riego de los cultivos y reducir las pérdidas de agua en las redes de conducción y distribución de los distritos de riego, en este trabajo se presenta una aplicación de la Teoría de control adaptable en la operación de canales de riego. La investigación se desarrolló para las condiciones de la red principal del Distrito de riego La Begoña, Guanajuato, México. Los resultados muestran que la variación de los parámetros de regulación en función del caudal de demanda de los niveles de referencia, y de la ubicación de las estructuras en operación, permite reducir las pérdidas de agua y las variaciones del nivel en los canales, a la vez que mejorar el servicio de riego.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/754

Sistema de control adaptable para la regulación de canales de riego

Alfonso Brenes Gámez

SEDENA, Costa Rica

Benjamín de León Mojarro
Víctor Manuel Ruiz Carmona

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Luis Rendón Pimentel

Comisión Nacional del Agua

Con el propósito de mejorar el servicio de riego de los cultivos y reducir las pérdidas de agua en las redes de conducción y distribución de los distritos de riego, en este trabajo se presenta una aplicación de la Teoría de control adaptable en la operación de canales de riego. La investigación se desarrolló para las condiciones de la red principal del Distrito de riego 085, La Beñoña, Guanajuato, México. El control adaptable se propone debido a que durante la operación de los canales se presentan grandes variaciones de la demanda de riego, de los niveles de referencia y de las políticas de maniobra de las estructuras de extracción y regulación, lo cual modifica las características dinámicas del funcionamiento hidráulico de los canales para cada valor del caudal, del nivel y de la localización de las estructuras en funcionamiento. El algoritmo de control regula el caudal aguas arriba de cada tramo de canal en forma proporcional al error entre el nivel medido aguas arriba del tramo y su referencia, y en forma proporcional e integral al error entre el nivel aguas abajo del tramo y la referencia correspondiente. El control del caudal se realiza con base en una primera precompensación, que depende del pronóstico del riego, del retardo y del tiempo de respuesta del canal, y en una segunda que repercute de aguas abajo hacia aguas arriba las correcciones en cada tramo hasta llegar a la fuente de alimentación. El algoritmo de control se probó en un modelo de simulación del flujo de agua en canales calibrado y validado con mediciones de campo. Los resultados muestran que la variación de los parámetros de regulación en función del caudal de demanda de los niveles de referencia, y de la ubicación de las estructuras en operación, permite reducir las pérdidas de agua y las variaciones del nivel en los canales, a la vez que mejorar el servicio de riego.

Palabras clave: regulación, control adaptable, precompensación, simulación, canales de riego.

Introducción

Según Ruiz *et al.* (1992), la operación de los canales de riego influye en el óptimo aprovechamiento del agua en los distritos de riego. El alto costo involucrado en la construcción de nuevos sistemas de riego, así como la falta de agua, obligan a mejorar los métodos de operación y administración usados en los distritos de riego.

Diferentes métodos basados en teoría de control, hidráulica y experiencia práctica han permitido mejorar la conducción y distribución de agua en los canales de riego (Burt, 1987; Rogers y Goussard, 1998; Malaterre *et al.*, 1988), y satisfacer adecuadamente las demandas de agua solicitada por los agricultores. Esto se traduce en una mayor libertad en el manejo del agua a nivel parcela y en el sistema de distribución. Lo

anterior trae consigo una reducción en las pérdidas de agua por aplicación y operación.

En este trabajo se propone un sistema de control para mejorar la operación de canales para riego, basándose en la regulación de niveles y gastos en cada sección y la previsión de cambios en la demanda de riego. El estudio se aplica al caso de la red principal del Distrito de riego 085, La Begoña, ubicado en Guanajuato, México. Específicamente, el presente trabajo se aboca a mejorar la operación de la red principal de conducción y distribución. El sistema de control se probó en un modelo de simulación para variaciones previstas e imprevistas de la demanda de riego.

Las variaciones previstas e imprevistas en la demanda de riego generan una amplia gama de condiciones de funcionamiento hidráulico en el canal. Para mejorar la operación del Canal Principal Margen Derecha (CPMD) es necesario contar con un sistema de control capaz de obtener un buen desempeño en todas las condiciones de funcionamiento del canal. Una forma de resolver el problema es mediante la aplicación de la teoría de control a la operación de canales. En particular, en este trabajo se considera el uso de un esquema de control adaptable, específicamente, el método de ganancias preprogramadas (Aström y Wittenmark, 1990).

Distrito de riego 085, La Begoña, Guanajuato

El Distrito de riego 085, La Begoña, Gto., se encuentra en la región hidrográfica del río Lerma en la cuenca del río Laja. El distrito tiene una superficie de 10,822 ha de riego, distribuidas entre 2,144 usuarios. Las fuentes de abastecimiento son la presa de almacenamiento "Ignacio Allende", además de 21 pozos oficiales y 121 particulares. El distrito se riega con dos canales principales, el Canal Principal Margen Derecha (CPMD) y el Canal Principal Margen Izquierda (CPMI). Estos canales son alimentados por dos presas derivadoras, Guadalupe, margen derecha y Soria, margen izquierda. El agua es conducida por el río Laja entre la presa de almacenamiento y las derivadoras.

El distrito se divide en once secciones de riego de las cuales el CPMD domina una superficie total de 7,828 ha, donde se cultivan trigo (*triticales sp*), alfalfa (*medicagos sativa*), sorgo (*sorghum vulgaris*), maíz (*zea mais*), aguacate (*persea americana*) y hortalizas. Este canal tiene una capacidad máxima de $10.15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y posee 28 represas y 80 tomas, ubicadas a lo largo del mismo. Las estructuras de control son de tipo radial y deslizante, y se operan en forma manual. El objetivo de las estructura de control es crear almacena-

mientos en los tramos de canal para alimentar las extracciones laterales. La estructura de extracción, ubicadas aguas arriba de la estructuras de control, son compuertas de carga constante o Miller. Para su correcta operación, las estructuras de extracción requieren de un nivel constante en el canal.

En la zona dominada por el CPMD la distribución del agua se efectúa por demanda controlada, con periodos de programación semanales. El método de operación es el de nivel constante aguas abajo del tramo. La regulación del canal es en forma manual, aplicando el método de regulación aguas arriba. De esta manera, se mantiene un tirante constante, aguas arriba de las compuertas, para abastecer los gastos demandados en los puntos de extracción (canales laterales y tomas directas) a lo largo del canal. Los métodos de operación y regulación se clasifican según las definiciones de Buyalski *et al.* (1991).

El comportamiento dinámico en régimen transitorio del CPMD se aproximó mediante el paquete de simulación numérica llamado "Simulation of Irrigation Canals" (SIC) desarrollado por el CEMAGREF (1991). Este modelo fue calibrado, para el caso del CPMD, por Mejía Sáenz *et al.* (1997). Este simulador resuelve numéricamente las ecuaciones no lineales de Saint Venant usando el esquema de diferencias implícitas de Preissman. El simulador requiere de todos los parámetros físicos e hidráulicos del canal, como son bordo libre, tamaño y número de puertas, etc., con el objeto de hacer lo más parecido a la realidad el comportamiento del canal.

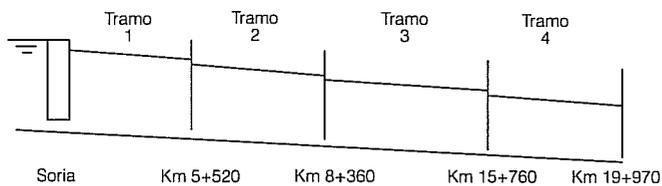
Propuesta para mejorar la operación del CPMD

Después de varias reuniones con los encargados de operación, visitas de campo y análisis de resultados obtenidos en simulación, se propuso, para fines de operación, dividir el CPMD en cuatro tramos (ilustración 1).

En el CPMD los gastos de operación pueden variar de 0.2 a $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, presentándose por tramo de canal las siguientes variaciones de caudal:

Tramo	Ubicación	Variaciones del gasto (m^3s^{-1})
1	Presa Derivadora Soria a Km 5+520	2 a 10
2	Km 5+520 a Km 8+360	1 a 4
3	Km 8+360 a Km 15+760	0.5 a 3.7
4	Km 15+760 a Km 19+970	0.2 a 2.5

1. Tramos de operación del Canal Principal Margen Derecha



Como una primera solución para mejorar la operación del CPMD, se propone automatizar cuatro estructuras reguladoras ubicadas en los extremos de los tramos, salvo la de aguas abajo del Tramo 4, donde se tiene un vertedor. Con base en lo anterior, y previendo un sistema de control aguas abajo, se observó que se tienen tres tramos donde se controla el tirante aguas abajo al final del tramo (variable a controlar) mediante el gasto aguas arriba del tramo (variable de control) y un último tramo en el cual sólo se mantendría un gasto constante al inicio del tramo. El usar el gasto como variable de control permite reducir las fuertes interacciones presentes entre tramos controlados (Clemmens y Strelkoff, 1994; Ruiz y Castillo, 1996).

El primer paso en el diseño de un sistema de control es el análisis del comportamiento dinámico del proceso a controlar. Esta primera etapa de análisis desempeña un papel fundamental en el diseño del algoritmo de control. La etapa de análisis determina las variables de control y a controlar, así como las características que debe tener el esquema de control para garantizar el funcionamiento deseado con el sistema de control.

Análisis de comportamiento dinámico del CPMD

Para conocer el comportamiento dinámico del CPMD, se introducen perturbaciones de tipo escalón sobre las distintas y posibles variables que afectan al proceso, observando su efecto sobre las posibles salidas. Por razones técnicas y prácticas, sólo se consideran las variables medibles aguas arriba y aguas abajo de cada tramo. Lo anterior reduce las posibles entradas a la abertura de compuerta y el gasto que pasa por ella, y como salidas el gasto y el tirante aguas abajo y aguas arriba. Ruiz *et al.* (1993, 1996), muestran que no es conveniente usar sólo la medición de gasto como variables de salida, debido a que el modelo de control (función de transferencia entre la variable a controlar y de control) encontrado para este caso presenta características dinámicas (ceros de fase mínima) que dificultan la tarea del regulador, independientemente del tipo que sea. Por lo tanto, en este caso se tomarán

como variables de salida los tirantes aguas arriba, al inicio, y aguas abajo, al final, de cada tramo de operación.

La respuesta del sistema a una entrada escalón es la evolución que presentan en el tiempo las salidas del sistema cuando a la entrada del sistema se le suma una señal escalón. La señal escalón está definida como:

$$X(t) = \begin{cases} X = \text{constante} & \text{para } t > 0 \\ 0 & \text{para } t \leq 0 \end{cases}$$

De la respuesta al escalón de cada tramo del CPMD, obtenida en simulación, se determinan los parámetros K , T y τ de la función de transferencia de primer orden:

$$\frac{\Delta Q_s(p)}{\Delta Q_e(p)} = \frac{Ke^{-\tau p}}{1 + Tp} \quad (1)$$

que aproxima el comportamiento dinámico presente entre la entrada (variación en el gasto aguas arriba, $\Delta Q_e(p)$) y la salida [gasto aguas abajo $\Delta Q_s(p)$ o variación en el tirante $\Delta Z_s(p)$]. K se le conoce como la ganancia estática del sistema, T es la constante de tiempo del sistema, τ es el retardo, que se define como el tiempo que transcurre entre la aplicación de una entrada al proceso y su manifestación en la salida, y p es la variable de Laplace. T se obtiene como 1.5 veces la diferencia entre t_2 y t_1 ; donde t_2 y t_1 son los tiempos en los cuales la respuesta del sistema a una entrada escalón alcanza 28.3 % y 63.2 % de su valor en estado estable respectivamente (valor de la salida cuando el tiempo tiende a ∞). El retardo τ se determina como $t_2 - T$. Los modelos obtenidos para gasto y tirante, en un punto medio de operación, se resumen en los cuadros 1 y 2. En estos cuadros se observa que tanto la constante de tiempo como el retardo de los modelos dinámicos del canal varían según el punto de funcionamiento. El comportamiento dinámico del canal puede ser aproximado por un modelo de primer orden cuyos parámetros cambian con el tiempo.

Para completar el análisis del comportamiento dinámico del canal se propone identificar modelos discretos. Estos modelos serán usados en la síntesis del esquema de control discreto.

Identificación de modelos discretos

A partir de hidrogramas obtenidos en simulación se identificaron, para cada tramo de canal, los parámetros y orden de los modelos que mejor aproximan el funcionamiento dinámico existente entre el caudal aguas arriba y los gastos o tirantes aguas abajo. Para

1. Modelo de primer orden para gasto en cada tramo del CPMD

Tramo	T (s)	τ (s)	K	Función de transferencia (1)
1	2490	1680	1	$\frac{e^{-1680p}}{1 + 2490p}$
2	2940	1800	1	$\frac{e^{-1800p}}{1 + 2940p}$
3	6000	3960	1	$\frac{e^{-3960p}}{1 + 6000p}$

2. Modelo de primer orden para tirante en cada tramo del CPMD

Tramo	T (s)	τ (s)	K	Función de transferencia (1)
1	2340	1620	0.1	$\frac{0.1 e^{-1620p}}{1 + 2340p}$
2	2970	1440	0.2	$\frac{0.2 e^{-1440p}}{1 + 2970p}$
3	6030	5160	0.2	$\frac{0.2 e^{-5160p}}{1 + 6030p}$

ello se utilizó un algoritmo de mínimos cuadrados, que se basa en la minimización del siguiente criterio (Söderström y Stoica, 1989):

$$V(n) = \sum_{k=1}^n [y(k) - \bar{y}(k)]^2 \quad (2)$$

donde:

$V(n)$ = criterio a minimizar

n = número total de observaciones

y = salida del proceso en el tiempo k (tirante o caudal aguas abajo)

\bar{y} = salida del proceso estimada por el modelo para el tiempo k .

Para representar la dinámica existente entre las salidas y entradas, se propone un modelo lineal discreto de la forma:

$$\bar{y}(k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k-d) \quad (3)$$

donde:

$u(k)$ = entrada al modelo en el tiempo k (incremento en caudal aguas arriba del tramo)

$\bar{y}(k)$ = salida del modelo en el tiempo k (incremento en caudal o tirante aguas abajo del tramo)

q^{-1} = operador retardo definido por $q^{-1}[x(k)] = x(k-1)$

$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$

$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb}$

$a_1, \dots, a_{na}, b_0, b_1, \dots, b_{nb}$ coeficientes de los polinomios $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$

d = retardo del proceso existente entre la salida y la entrada en múltiplos del periodo de muestreo. La entrada aplicada al sistema en $u(k-d)$ afecta la salida de éste en $y(k)$.

En función del comportamiento dinámico del canal en lazo abierto (sin control) y el desempeño deseado en lazo cerrado (con control), se estableció un período de muestreo de 12 minutos (Aström y Witenmark, 1990).

Usando un algoritmo de mínimos cuadrados, se identificaron los parámetros de modelos discretos (3) que mejor aproximan el comportamiento dinámico de cada tramo de canal. Como resultado de las distintas pruebas efectuadas, se determinó el orden de los polinomios (na y nb) y el retardo de cada tramo del canal para los diferentes gastos y tirantes de operación.

Si bien el algoritmo de identificación determina los parámetros del modelo que minimizan $V(n)$, es importante verificar que el modelo reproduzca adecuadamente la dinámica del sistema en cuanto a estabilidad en lazo abierto (polos) y ganancia estática (Söderström y Stoica, 1989). La ganancia se determina mediante la relación $B(q^{-1})/A(q^{-1})$ evaluando $q^{-1} = 1$. Para el caso en el cual la salida es gasto, los modelos deben ser conservativos (conservación de masa), es decir, que la ganancia estática será igual a uno.

Los modelos discretos obtenidos, entre el incremento en caudal aguas arriba e incremento en caudal aguas abajo ($\Delta Q_s/\Delta Q_e$), y entre incremento en caudal aguas arriba e incremento en tirante aguas abajo ($\Delta Z_s/\Delta Q_e$), para el primer tramo de canal en diferentes puntos de operación (gastos y tirantes), se presentan en el cuadro 3.

De los modelos obtenidos se observa que a medida que el gasto y el tirante aumentan, el sistema responde más rápido y el retardo disminuye. Para el tramo 1 el retardo pasa de 5 periodos de muestreo y una constante de tiempo de 0.8651 para un gasto de 2 m³/s y 0.9 m de tirante, a un retardo de 3 periodos de muestreo y una constante de tiempo (T) de 0.8016 para gasto de 9 m³/s y 1.6 m de tirante.

Las funciones de transferencia obtenidas mediante el método de mínimos cuadrados aproximan adecuadamente el comportamiento hidráulico del canal como lo demuestran las comparaciones hechas por Brenes (1993). En los tramos 1 y 2 se encontró que modelos

3. Modelos discretos identificados para gasto y tirante en el tramo 1

Qref (m³s⁻¹)	Zref (m)	ΔQe/ΔQs		ΔZs/ΔQe	
		ΔQ _{aguas arriba} /ΔQ _{aguas abajo}	q⁻⁵	ΔZ _{aguas arriba} /ΔQ _{aguas abajo}	q⁻⁵
2	0.9	$\frac{0.0548 + 0.07813q^{-1}}{1 - 0.85816q^{-1}}$	q⁻⁵	$\frac{0.0685 + 0.09q^{-1}}{1 - 0.8651q^{-1}}$	q⁻⁵
3	1.0	$\frac{0.0383 + 0.1015q^{-1}}{1 - 0.86134q^{-1}}$	q⁻⁴	$\frac{0.1354 + 0.0565q^{-1}}{1 - 0.817q^{-1}}$	q⁻⁵
4	1.1	$\frac{0.07861 + 0.0855q^{-1}}{1 - 0.835q^{-1}}$	q⁻⁴	$\frac{0.0816 + 0.0952q^{-1}}{1 - 0.8287q^{-1}}$	q⁻⁴
5	1.2	$\frac{0.0189 + 0.1402q^{-1}}{1 - 0.8593q^{-1}}$	q⁻⁴	$\frac{0.1118 + 0.0822q^{-1}}{1 - 0.7978q^{-1}}$	q⁻⁴
6	1.3	$\frac{0.0399 + 0.1366q^{-1}}{1 - 0.8420q^{-1}}$	q⁻³	$\frac{0.1835}{1 - 0.8165q^{-1}}$	q⁻⁴
7	1.4	$\frac{0.0595 + 0.1289q^{-1}}{1 - 0.8264q^{-1}}$	q⁻³	$\frac{0.1937}{1 - 0.7914q^{-1}}$	q⁻⁴
8	1.5	$\frac{0.0769 + 0.1211q^{-1}}{1 - 0.8120q^{-1}}$	q⁻³	$\frac{0.0843 + 0.1331q^{-1}}{1 - 0.8126q^{-1}}$	q⁻³
9	1.6	$\frac{0.0905 + 0.1135q^{-1}}{1 - 0.7982q^{-1}}$	q⁻³	$\frac{0.1028 + 0.1238q^{-1}}{1 - 0.8016q^{-1}}$	q⁻³

de primer orden reproducen satisfactoriamente el comportamiento dinámico presente. Para el caso del tramo 3 la dinámica es más compleja, requiriéndose un modelo de orden 2. Este último tramo es el que presenta el mayor retardo, debido a su longitud.

Al usar los parámetros del modelo obtenido en un punto de operación en otro, el modelo no puede aproximar el comportamiento dinámico presente en los otros puntos de funcionamiento. De lo anterior se concluye que no es adecuado usar un modelo con coeficientes constantes, para describir el funcionamiento del canal en todas sus condiciones de operación.

De pruebas realizadas en simulación, si la perturbación es de gran magnitud, el tiempo que tarda en llegar el ajuste en gasto, desde la presa derivadora hasta el punto donde se presenta la perturbación, puede ser tal que sea imposible evitar que el canal se seque o desborde (Brenes, 1993). Este problema está relacionado con la capacidad de los canales. En el tramo 1 la magnitud de la perturbación no puede ser mayor a ± 0,5 m³s⁻¹, para el tramo 2 ± 0.25 m³s⁻¹ y para el tramo 3 ± 0.15 m³s⁻¹. Si las perturbaciones son mayores, el canal se desborda o se seca.

Una vez que se tiene caracterizado el comportamiento dinámico de los tramos de canal se pasa al diseño del regulador.

Sistema de control para el CPMD

Como primer paso en el desarrollo del sistema de control, se propone usar un sistema de control distribuido, donde cada tramo del canal es controlado independientemente de los demás tramos (Ruiz *et al.*, 1998). En la ilustración 2 se muestra el esquema de regulación para cada tramo de operación del CPMD. Los correctores o reguladores C₁ y C₂ mantienen los niveles aguas arriba (Y_A) y aguas abajo (Y_B) del tramo, iguales a sus respectivas referencias Y_{Aref} y Y_{Bref}, modificando las condiciones de operación de la estructura de control aguas arriba de cada tramo. En la ilustración 2, los niveles aguas abajo y aguas arriba del tramo son Y_U y Y_L respectivamente, y Q_A y Q_B los gastos aguas arriba y aguas abajo del tramo de canal. Con el fin de reducir las fuertes interacciones entre los tramos, se introduce un control en lazo abierto que incorpora la previsión de la demanda de riego y la propagación aguas arriba de las correcciones hechas por los reguladores.

Los reguladores C₁(q⁻¹) y C₂(q⁻¹) son del tipo proporcional e integral (PI). La ecuación del regulador PI, en forma discreta se expresa (Isermann, 1989):

$$u(k) = Kp e(k) + Ki \left(\sum_{i=1}^k e(i) + \frac{e(k) + e(0)}{2} \right) \quad (4)$$

donde:

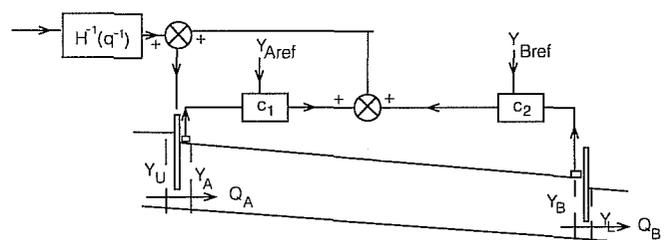
- Kp = constante proporcional
- Ki = constante integral
- u(k) = señal de control, entrada al sistema
- e(k) = y_{ref}(k) - y(k)

con:

- y_{ref}(k) = valor de referencia para la salida del sistema
- y(k) = salida del sistema

A partir de las solicitudes de riego, el sistema de previsión de la demanda de riego (control en lazo

2. Esquema general de regulación de cada tramo del CPMD



abierto) ajusta los gastos a lo largo del canal para satisfacer la demanda de riego. En la ilustración 2, $H^{-1}(q^{-1})$ es el inverso del modelo (1).

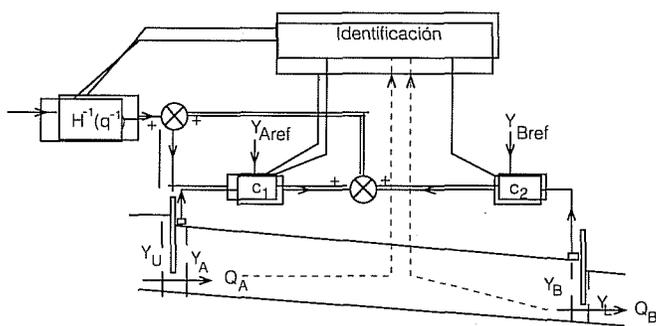
Implementación adaptable del sistema de control propuesto

El control adaptable está formado por un esquema de control (regulador, previsión) y un esquema de identificación. Este último determina las condiciones de operación del canal. El control adaptable en función de las condiciones hidráulicas del canal identifica la función de transferencia a usar en el esquema de previsión $H(q^{-1})$ y modifica los parámetros de cada corrector K_p y K_i . En este trabajo, como primera etapa en el uso adaptable de controladores, se usa un esquema de control con ganancias preprogramadas. Este esquema de control cambia los parámetros K_p y K_i del controlador, en función del gasto que circula aguas arriba del tramo. La implementación adaptable del sistema de control propuesto en la ilustración 2 aparece en la ilustración 3.

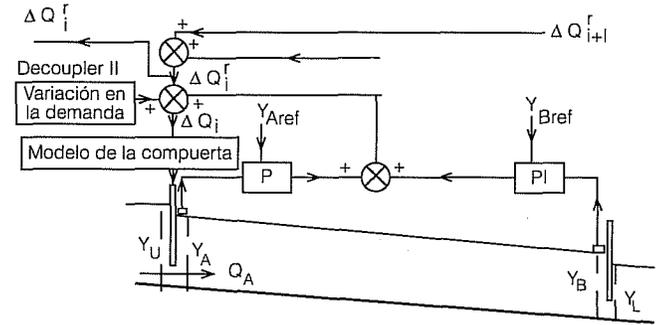
El regulador finalmente utilizado consta de dos correctores, uno de tipo proporcional (P) y otro de tipo proporcional-integral (PI) (ilustración 4). Estos correctores o reguladores mantienen el nivel aguas abajo de cada tramo igual a su referencia, modificando el gasto que entra aguas arriba del tramo. Este sistema de regulación utiliza el nivel aguas arriba del tramo para aumentar la robustez del controlador respecto a perturbaciones (aumento en los márgenes de fase y ganancia). Lo anterior se traduce en una operación más segura y confiable, como lo muestran España y Ruiz (1987).

El sistema de control finalmente usado presenta dos precompensaciones (control en lazo abierto) que toman en cuenta información (cambios en las extracciones laterales) del canal procedente de otros tramos,

3. Implementación adaptable del sistema de control de cada tramo del CPMD



4. Representación de la regulación de los tramos de operación



para reducir las interacciones entre tramos controlados. La primera precompensación, descrita anteriormente, es para la previsión de la demanda de riego programada. La segunda consiste en propagar de aguas abajo a aguas arriba las acciones de los correctores (ΔQ_{i+1}). Esta última precompensación permite reducir el tiempo que tarda el canal en corregir un cambio no previsto en la demanda de riego, así como su efecto en los tirantes del canal.

Resultados y discusión

Una vez definida la estructura del sistema de regulación, se procede a determinar los parámetros del sistema y a probar su funcionamiento. Para probar el desempeño del sistema de control propuesto, se introdujeron variaciones previstas (cambios en la demanda) y no previstas en las extracciones laterales. Las primeras son manejadas por el mecanismo de previsión de cambios en la demanda de riego (lazo abierto). Las variaciones no previstas son compensadas por los correctores o reguladores (lazo cerrado) y la segunda precompensación. En las pruebas en simulación realizadas, la abertura de compuerta no puede tomar valores físicamente imposibles (saturación).

Pruebas en lazo cerrado, regulador

Los primeros ensayos efectuados con los reguladores C_i sirvieron para estudiar el sistema de regulación, y determinar el parámetro proporcional aguas arriba (K_{p1}), aguas abajo (K_{p2}) y el parámetro integral aguas abajo (K_{i2}) de cada tramo, en distintos puntos de operación. Considerando las interacciones entre los tramos controlados, los parámetros de los controladores se seleccionaron de forma tal que el regulador corrija en el menor tiempo posible las variaciones en el tirante aguas abajo del tramo y no se presente un error mayor

4. Valores de Kp y Ki seleccionados en cada tramo de operación del CPMD

Qref (m³s⁻¹)	Tramo	Retardo (d)	Kp	Ki
5.9	1	3		
	aguas arriba		10.0	0.0
2.6	2	2		
	aguas abajo		3.5	0.0
1.9	3	7		
	aguas arriba		1.0	0.1
4.0	1	4		
	aguas abajo		3.0	0.0
1.8	2	2		
	aguas arriba		0.3	0.1
1.3	3	7		
	aguas abajo		3.0	0.0
7.0	1	3		
	aguas arriba		0.2	0.01
3.0	2	2		
	aguas abajo		3.5	0.0
2.2	3	6		
	aguas arriba		4.0	0.0
	aguas abajo	0.5	0.01	

Kp = ganancia proporcional; Ki = ganancia integral;
Qref = gasto base aguas arriba del tramo.

al 10% del valor del tirante deseado (referencia). En estas pruebas se introdujeron variaciones de: 0.1 m³s⁻¹ en el primer tramo (Km 3+200m), 0.1 m³s⁻¹ en el segundo tramo (Km 6+830m) y 0.05 m³s⁻¹ en el tercer tramo (Km 12+030m).

En una primera etapa de pruebas en lazo cerrado se determinaron los parámetros Kp y Ki para los tres tramos del CPMD, con los cuales se obtenía el funcionamiento especificado. Estas pruebas se realizaron tomando el caso de un caudal de 5.9 m³s⁻¹ en la obra de cabeza del CPMD. En una segunda etapa se repitió la prueba anterior en otros puntos de funcionamien-

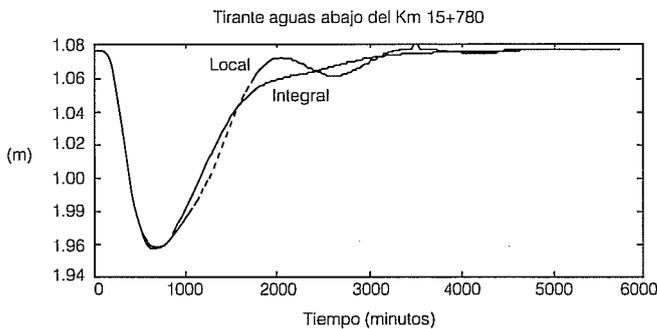
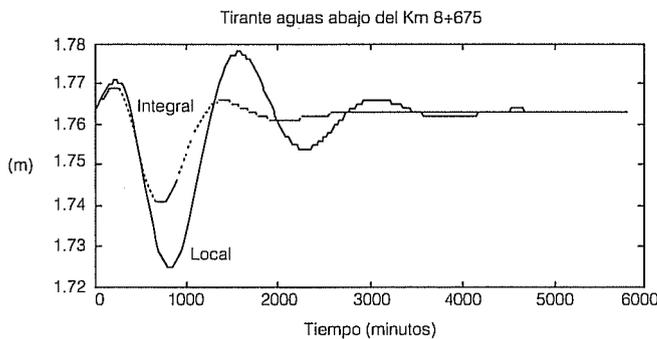
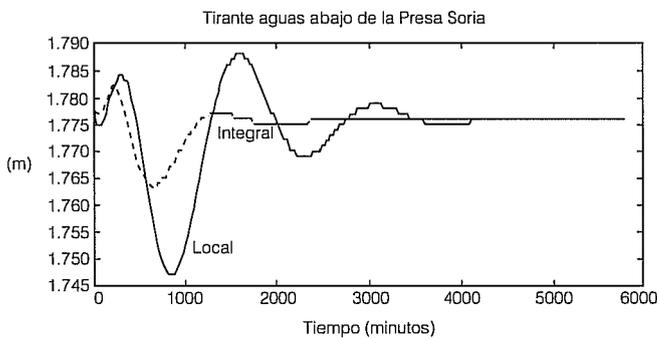
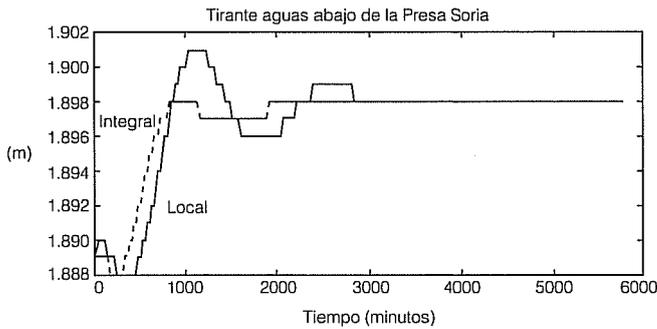
to, conservando los parámetros del controlador previamente seleccionados para dos diferentes gastos en la obra de toma del CPMD 4 y 7 m³s⁻¹. En el tercer tramo, para el caso de 4 m³s⁻¹, se observó que el tirante aguas abajo al final del tramo presenta oscilaciones; el sistema es inestable. Para el caso de 7 m³s⁻¹ se presenta un error máximo, entre el tirante aguas abajo al final del tramo y su referencia, mayor al 10% de la referencia. El sistema en lazo cerrado no cumple los objetivos del funcionamiento que se desean. En una tercera etapa, se modifican la constante proporcional (Kp,) en el tramo 3, con lo cual el sistema en lazo cerrado alcanza el funcionamiento deseado para 4 y 7 m³s⁻¹. Lo anterior justifica la necesidad de utilizar un control adaptable simple, como el de ganancias preprogramadas, que reajusta los parámetros de acuerdo con el punto de operación para conservar el desempeño deseado en lazo cerrado.

El control con ganancias preprogramadas ajusta los parámetros del controlador del tramo 3 en función del gasto aguas arriba del tramo. Para gastos menores a 1.5 m³s⁻¹, en el tramo 3 se usan los parámetros del controlador obtenidos para 4 m³s⁻¹ en la obra de toma del CPMD. Para gastos mayores a 2.1 m³s⁻¹ se usan los parámetros obtenidos con 7 m³s⁻¹, y en los demás gastos los de 5.9 m³s⁻¹. En el cuadro 4 aparecen los parámetros seleccionados para 5.9 m³s⁻¹ y ajustados para los casos de 4 y 7 m³s⁻¹.

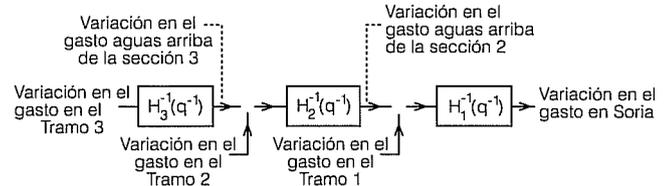
La regulación en lazo cerrado está destinada a corregir los cambios no previstos en la demanda de agua solicitada. Esta regulación se puede hacer de manera individual (local, tramo por tramo) o global (integral, en todo el canal, tomando en cuenta la acción de control de los tramos aguas abajo). En el caso de regulación global o integral, se está usando la segunda precompensación, la cual propaga las correcciones de aguas abajo hacia aguas arriba, permitiendo trabajar el canal en forma global.

En la ilustración 5 se presentan los resultados obtenidos en simulación con una regulación local por tramo y una regulación integral, ante una variación de 0.05 m³s⁻¹ en la toma ubicada en Km 12+030 del tramo 3. Como se puede observar, con la regulación integral o global las correcciones de los tramos aguas abajo repercuten instantáneamente en los tramos aguas arriba. La regulación integral reduce el efecto producido en el canal por cambios no previstos en la demanda de riego y el tiempo necesario para corregirlos. Esto es debido a que la regulación integral ajusta el gasto en todas las estructuras de control ubicadas aguas arriba de donde se presenta la perturbación, y no espera a que la perturbación se propague hidráulicamente y cada controlador la detecte y corrija.

5. Evolución de los tirantes en distintos puntos del canal ante una extracción de $0.05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el km 12+030 con acción local e integral



6. Precompensación de la previsión de la demanda de riego

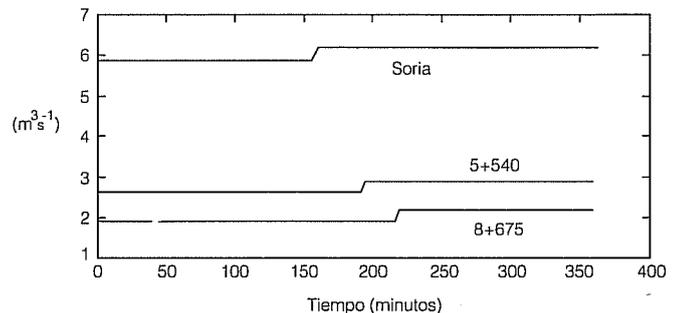


Regulación en lazo abierto

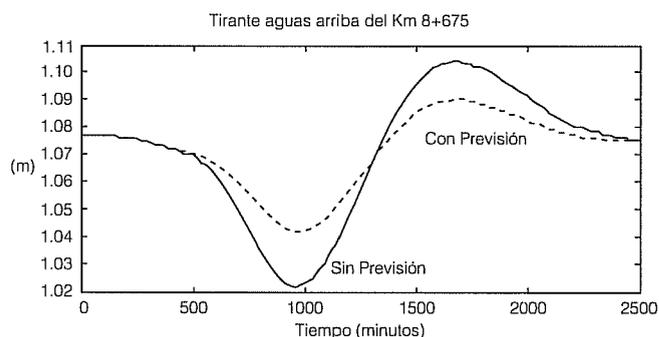
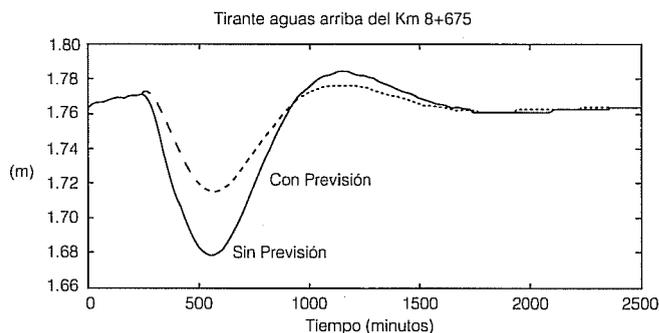
En el cuadro 3 se observa que los modelos que aproximan el comportamiento dinámico entre el gasto aguas arriba y aguas abajo de un tramo presentan cero mayores a 1 en algunos casos. Esto se debe a la forma en la cual el modelo acomoda el retardo entre la entra y salida. En tal caso, si se usara el inverso del modelo en el sistema de previsión de la demanda de riego, este sería inestable (Aström y Wittenmark, 1990). Por lo anterior, se optó por usar el modelo igual a un retardo puro. El modelo propuesto es usado para determinar la evolución del gasto en cada estructura de control, necesario para satisfacer en el futuro la nueva demanda de riego. Tomando los cambios en la demanda de riego de aguas abajo hacia aguas arriba, se determina la evolución del gasto, en cada estructura de control, necesario para obtener la nueva demanda de riego (ilustración 6), donde $H_i^{-1}(q^{-1})$ es el modelo dinámico que relaciona el gasto aguas abajo con el gasto aguas arriba en cada tramo.

En la ilustración 7 se presenta, para el caudal de referencia de $5.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, la evolución del gasto en las compuertas ubicadas en: Soria, Km 5+540 y Km 8+675, ante un incremento programado de $0.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en la extracción del Km 12+030, tercer tramo, para $t = 300$ minutos. Como se observa, la corrección ocurre primero en Soria, posteriormente se efectúa en la compuerta ubicada en el Km 5+540, y por último se corrige en el

7. Tiempos de anticipación al extraer $0.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el km 12+030



8. Evolución del tirante en el canal al extraerse $0.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el km 6+830



Km 8+675, para así llegar al tramo 3, donde se presentó el cambio previsto en la demanda de riego. Esta anticipación, con la que se ajusta el gasto en cada estructura de control, es función del tiempo que tarda el agua en recorrer el canal entre la estructura de control y el punto donde se cambia la demanda.

Funcionamiento del sistema de control completo

Mediante simulación, se evalúa el funcionamiento del sistema sujeto a un aumento de $0.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en la extracción ubicada en Km 6+830, en el tramo 2. Este cambio se analizó desde dos enfoques diferentes. En el primer caso se considera como una perturbación prevista (cambio en la demanda) y en el otro como no prevista. El efecto que tiene este cambio en gasto sobre el canal para las dos condiciones diferentes de operación consideradas, se evaluó en los niveles aguas arriba de las dos compuertas bajo control situadas aguas abajo (Km 8+675 y Km 15+780). Los resultados (ilustración 8) indican que el mecanismo de previsión redujo las variaciones en los tirantes al cambiar la demanda de riego.

Cuando la demanda de riego cambia, el sistema de previsión anticipa los cambios en gasto requeridos en las estructura de control para satisfacer la nueva de-

manda. Estos ajustes se hacen de aguas arriba hacia aguas abajo. El modelo usado en la previsión presenta errores, por lo cual es necesario contar con un esquema de regulación que elimine el error introducido por el modelo. Si el cambio en gasto no es previsto y no se considera en la nueva demanda de riego, el regulador iniciará los ajustes necesarios para corregir la perturbación hasta que ésta sea detectada en el nivel aguas abajo del tramo donde se introdujo el cambio. Esto hace que se requiera más tiempo para corregir la perturbación, y que los errores observados entre el tirante aguas abajo del tramo y su referencia sean mayores.

Conclusiones

El sistema de regulación propuesto corrige cambios programados y no programados en la demanda de riego, reduciendo el desperdicio del agua.

Las dos precompensaciones introducidas permiten, por un lado, disminuir las perturbaciones que se generan al cambiar la demanda de riego (prevista) y, por otro lado, disminuir el tiempo necesario para corregir cambios (no previstos) en la demanda de riego, alterando lo menos posible los tirantes a lo largo del canal.

En el CPMD del Distrito de riego La Begoña se observa que el tramo 3 es el que, por sus características físicas e hidráulicas, requiere de un sistema de regulación más complejo para obtener un buen funcionamiento.

Debido a los métodos de diseño usados en canales, los cuales no consideran los aspectos de operación, no es posible mediante el uso exclusivo de reguladores en lazo cerrado, empleando control distribuido, resolver el problema de operación de un canal abierto. Es indispensable considerar las precompensaciones o, bien, considerar el uso de esquemas de control multivariable. Estos últimos esquemas de control involucran un mayor esfuerzo en el análisis del sistema, diseño del regulador e implementación en campo.

Recibido: 30/VII/98
Aprobado: 25/V/99

Referencias

- Aström, K. J. y B. Wittenmark. 1990. *Computer Controlled Systems*. Nueva Jersey, Prentice Hall, pp. 180-215.
- Brenes G., A. 1993. *Sistema de control adaptable para la regulación del flujo de agua en canales para riego*. Tesis de Maestría, México, Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, pp. 10-130.

- Buyalski, C. P., D. G. Ehler, H. T. Flavey, D. C. Rogers y E. A. Serfozo. 1991. *Canal systems automation manual*, Vol. 1. EUA, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- CEMAGREF (Centro Nacional de Ingeniería Rural de Aguas y Bosques de Francia). 1991. *Hydraulic Simulation of Canals (SIC)*. Francia, pp. 1-200.
- Clemmens, A. J. Y T. S. Strelkoff. 1994. Irrigation canal hydraulics and controls. *Annual research report U. S. water conservation laboratory 1993*, Phoenix, pp.22-23.
- España, M. y V. M. Ruiz. 1987. *Control adaptable con modelo de regulación de un canal*, II-5142, México, Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 10-40.
- Isermann, R. 1989. *Digital Control Systems*. Berlín, Springer Verlag, pp. 130-135.
- Malaterre, P. O., D. C. Rogers y J. Schuurmans. 1988. *Classification of Canal Control Algorithms*. *J. Irrig. And Drain. Engrg.*, Vol. 124, No. 1, pp. 3 a 10. OJO: FALTA EL LUGAR
- Mejía Sáenz, E., B. de León M., L. Rendón P., O. Palacios V., B. Cuevas R. 1997. Adaptación de un modelo de simulación en régimen no permanente, *Agrociencia*, 31:1-8.
- Rogers, D. C. y J. Goussard (1998). Canal control algorithms currently in use, *J. Irrig. And Drain. Engrg.*, Vol. 124, Núm. 1, pp. 11 a 15, EUA.
- Ruiz C., V.M., B. de León M., J. González T. y A. Brenes. G. 1992. *Regulación automática de la distribución de agua en el Distrito de Riego la Begoña*, México, pp. 10-15
- Ruiz C., V. M., C. Verde y M. Rico S. 1993. *Esquemas de control para canales de riego parte I. II-1131*, México, Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 20-30
- Ruiz C. V. M., J. Castillo y B de León (1996). Dynamic Analysis of Multi-Pool irrigation Canal, *Memorias del congreso norte americano del agua y ambiente*, Anaheim, ASCE.
- Ruiz C., V. M., A. J. Clemmens y J. Schuurmans (1998). Canal control algorithms Formulation, *J. Irrig. And Drain. Engrg.* Vol. 124, No. 1, pp. 31 a 39, EUA.
- Söderström, T. y P. Stoica. 1989. *System identification*, Prentice Hall, EUA, pp. 1-31.

Abstract

Brenes Gamez, B. de Leon; V.M. Ruiz; L. Rendon. "Adjustable control system for irrigation channels regulation". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XV, núm. 1, pages. 63-72, january-april, 2000.

This paper presents the use of control theory in irrigation canal operation to improve water delivery management for irrigation and to reduce the water losses caused by operation. This research was developed for the main distribution network of the Begoña Irrigation District, Guanajuato, Mexico. A distributed control system was developed for three of the four operation sections of the Main Right Bank Canal. The regulator used determines the flow rate upstream each section proportional to the error between the upstream level of the section and its reference level, and in a proportional-integral form to the error between the downstream level of the section and its reference level. Two feedforward components were used. The first one considers the conveyance time to anticipate flow adjustments required for changing water demand. The second one reduces the cross-coupling effects between the controlled canal sections by the control actions upstream propagation. The canal dynamics and the bad performance of the control system, when the canal operation point change, suggest the use of an adaptive, self-tuning, implementation of the regulator used. The regulator capacity to compensate flow rate variations was tested. The feedforward components performance was evaluated to schedule and not schedule water demand variations. The simulation results demonstrated the ability of the control system to improve canal operation. The control system developed is an alternative to the control problem in irrigation canals.

Key words: regulation, adaptive control, feedforward, simulation, irrigation canals.

Dirección institucional de autores:

Alfonso Brenes Gámez
SEDENA, Apdo. 2150, Plaza González Víquez,
Z. P. 1002m, San José, Costa Rica.

Benjamín de León Mojarro
Victor Manuel Ruiz Carmona
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paso Cuauhnáhuac 8532,
Jiutepec Mor., C.P. 62550
Teléfono y Fax (73) 194041
Email: vmruiz@tlaloc.imta.mx
bdeleon@riego.imta.mx

Luis Rendón Pimentel
Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur 1960 - 6º piso
Teléfono: 663 22 09