

Regulación de una red de canales de riego

Benjamín de León Mojarro

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Jean Verdier

Centro Nacional del Cuerpo Rural de las Aguas y los Bosques, Montpellier, Francia

Alan Piquereau

Centro de Estudios y de Investigación de Toulouse, Francia

Víctor Ruiz Carmona

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Luis Rendón Pimentel

Comisión Nacional del Agua, México

La mayor parte de la producción agrícola de México se genera en las zonas denominadas distritos y unidades de riego. En estas áreas, la disponibilidad y la competencia por el agua ha obligado a emprender programas de tecnificación integral que permitan mejorar el uso eficiente del agua y su productividad. Así, de 1996 a 2001, se tecnificaron alrededor de setecientas mil hectáreas con sistemas de riego de baja y alta presión, y se construyeron redes colectivas de baja presión en superficies de quinientas a cuatro mil hectáreas en varios de estos distritos. Asimismo, la transformación de los sistemas de riego parcelario y de la distribución interparcelaria necesita de un cambio en la regulación de los canales principales, a fin de que se pueda brindar a los usuarios un servicio de riego flexible, seguro, equitativo y eficiente. En varias zonas de riego del país, los canales laterales se han sustituido por redes colectivas de baja presión, entubadas con materiales plásticos y alimentadas por estaciones de bombeo o por los propios canales cuando ha existido carga suficiente. La regulación de canales de riego consiste en optimar el proceso de conducción y distribución del agua desde la fuente de abastecimiento hasta los sitios de utilización para satisfacer la demanda evapotranspirativa de los cultivos existentes en una zona de riego. Esta optimización consiste en generar y aplicar 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. Aunque la regulación de canales puede abordarse bajo diferentes puntos de vista, la metodología de regulación propuesta resulta fácilmente adaptable a redes de canales de diferente configuración sujetas a variaciones temporales. En efecto, en los modelos de representación de los canales, en la determinación e identificación de parámetros y en la elaboración de comandos de control, se siguen formas generales de razonamiento que resultan aplicables en la mayoría de redes de canales a cielo abierto. Los resultados obtenidos permiten concluir que la aplicación de la teoría de control en la regulación de canales es una alternativa que ayuda a reducir las pérdidas de agua debidas a la operación, así como a mejorar el servicio de la irrigación en los distritos de riego.

Palabras clave: regulación de canales, algoritmos de control.

Introducción

En México, los distritos y las unidades de riego cubren una superficie de seis millones de hectáreas y aportan el 56% del valor de la producción agrícola nacional. En estas zonas, la disponibilidad y la competencia por el agua ha obligado a emprender programas de tecnificación integral para mejorar tanto la eficiencia de uso de este recurso como la productividad. Mediante tales programas se han tecnificado con sistemas de riego de baja y alta presión alrededor de setecientas mil hectáreas y construido redes colectivas de baja presión en superficies de quinientas a cuatro mil hectáreas en varios distritos de riego (periodo 1996-2001). Esta transformación de los sistemas de riego parcelario y de la distribución interparcelaria también necesita un cambio en la operación de los canales principales para proporcionar a los usuarios un servicio de riego flexible, seguro, equitativo y eficiente.

En general, los usuarios del agua son los organismos operadores, las sociedades de responsabilidad limitada, las asociaciones de usuarios y los productores. Las sociedades de responsabilidad limitada operan los canales principales; las asociaciones de usuarios, las redes interparcelarias y los productores, el riego parcelario. La calidad del servicio de riego es función de la infraestructura, de la organización para distribuir el agua y de los medios para estimar la demanda, realizar mediciones y supervisar la distribución en la red de canales.

En la operación de los distritos de riego, la regulación de los canales juega un papel preponderante, ya que consiste en adaptar el transporte y la distribución del agua a las necesidades de riego de los cultivos sin excesos y sin falta de agua.

Las obras de conducción y distribución se integran de un conjunto de canales a cielo abierto sobre los cuales se instalan las estructuras necesarias de regulación (compuertas, vertedores, etcétera). El funcionamiento de estas obras se evalúa como eficiente si se lleva a cabo sin exceso y sin falta de agua, y sin alterar demasiado el caudal de las extracciones laterales. Para mantener tirantes y caudales constantes dentro de un cierto rango es necesario maniobrar las estructuras de regulación. La maniobra de estas estructuras constituye una aplicación del control automático en la operación de canales, la cual puede ser muy variada, según el objetivo de la regulación, las características y configuración de la red de canales, la variable de regulación y la variable regulada.

La configuración de los canales es compleja, ya que en ellos se alojan estructuras de control estáticas (vertedores) y dinámicas (compuertas) de diferentes tipos; importantes estructuras de extracción, como las de los

canales laterales y una gran cantidad de tomas directas o tomas granja con pequeños caudales, así como estructuras de aportes laterales, como pozos y estaciones de bombeo que descargan a los canales. La representación matemática de este conjunto de elementos se puede realizar mediante un modelo de flujo transitorio del tipo de Saint-Venant. Sin embargo, con fines de regulación, se requiere una representación más sencilla y menos exigente en información y tiempo de cálculo, como el modelo de Hayami y los modelos de segundo orden, entre otros.

En los canales de riego, las variables susceptibles de regularse son las siguientes: el tirante, el volumen y el caudal; las variables de regulación son la abertura de las compuertas y el caudal. Los canales de riego son sistemas con parcial independencia hidráulica, ya que se conocen las leyes de variación entre los tramos delimitados por las estructuras de regulación. Por lo tanto, en cada tramo es posible establecer un procedimiento de regulación integrador de la parte aguas abajo. Esta integración se puede realizar con base en la previsión de la demanda de riego y la repercusión de la acción en lazo cerrado.

Modelación del fenómeno de transporte en canales de riego

Todo problema de regulación o de control requiere de la formulación matemática del sistema que se estudia. En el caso de los canales de riego, el fenómeno que se necesita representar matemáticamente corresponde a la propagación de los caudales en régimen transitorio, ya que los regímenes permanentes, uniforme y gradualmente variado, se presentan en tramos específicos de los canales cuando las variaciones respecto al tiempo de las características del flujo (tirante, área hidráulica, velocidad y caudal) son constantes a lo largo del conducto o presentan cambios graduales en la dirección del flujo.

El régimen de flujo uniforme se establece cuando las fuerzas gravitacionales y las fuerzas de fricción están en equilibrio. Esta situación se obtiene en el momento en que las pendientes de las líneas de energía y de la rasante del canal alcanzan un mismo valor. Evidentemente, esto supone que el canal es uniforme en geometría, pendiente y rugosidad, y que los remansos causados por las estructuras de control no afectan al tirante normal, correspondiente a cada valor del caudal de operación. En condiciones regulares de operación de canales raras veces se encuentra dicha situación. Este régimen de flujo es más ideal que real, pues supone canales infinitamente largos y sin obstáculos que obstruyan el flujo. Por esta

razón se utiliza como una referencia muy útil en el diseño y revisión de proyectos.

Aunque los canales y las estructuras se diseñan y proyectan para conducir y controlar el caudal máximo, la gama de caudales de operación es muy amplia y varía en función de la demanda de riego de los cultivos. Para controlar la conducción y la distribución de estos caudales, es necesario instalar estructuras de control del caudal y del tirante en los canales. En este caso, las líneas de energía y de la rasante del canal no son paralelas gracias a los remansos generados por tales estructuras. Sin embargo, debido al cambio gradual de la velocidad media de una sección del canal a otra, el régimen de flujo se clasifica como gradualmente variado. Este tipo de flujo se presenta cuando las estructuras permanecen estáticas. Empero, cuando se varía la altura de los vertedores, la abertura de las compuertas o los caudales en las tomas laterales, el flujo se vuelve transitorio. Dicho régimen de flujo es el que predomina en la operación de canales de riego. Los flujos uniforme y gradualmente variado son casos particulares del flujo transitorio. La formulación del flujo transitorio en canales de riego se representa mediante el modelo de Saint-Venant (Mejía et al., 1997).

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + T \frac{\partial Z}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Qv)}{\partial X} + gA \frac{\partial Z}{\partial X} = -gS_f + Kqv \quad (2)$$

donde:

- T = ancho de la superficie libre (L).
- A = área hidráulica (L^2).
- Z = cota de la superficie libre (L).
- g = aceleración gravitacional (LT^{-2}).
- S_f = pendiente de la línea de energía (LL^{-1}).
- q = caudal lateral (L^2T^{-1}).
- t = tiempo (T).
- Q = caudal (L^3T^{-1}).
- X = distancia (L).
- v = velocidad media (LT^{-1}).
- K = 0 si q es un aporte.
- K = 1 si q es una extracción.

Debido a la naturaleza no lineal del modelo de Saint-Venant, las ecuaciones 1 y 2 no tienen solución analítica. Por lo tanto, se debe recurrir a su linealización mediante discretización numérica.

Utilizando un esquema implícito de diferencias finitas, las ecuaciones 1 y 2 se linealizan en la forma de las ecuaciones 3 y 4, respectivamente (Cunge, 1975; Pochat, 1983).

$$\Delta Q_i = A \Delta Q_{i+1} + B \Delta Z_{i+1} + C \quad (3)$$

$$\Delta Z_i = D \Delta Q_{i+1} + E \Delta Z_{i+1} + F \quad (4)$$

Los coeficientes A, B, C, D, E y F varían de un paso de tiempo a otro, y el índice i define la sección de cálculo dentro del espacio de discretización.

El conjunto de ecuaciones 3 y 4 en cada punto del dominio de discretización se complementa con dos ecuaciones que son las condiciones de frontera en los extremos inicial y final del canal. Además, como en todo problema de integración de ecuaciones diferenciales, se requiere de las condiciones iniciales de las funciones $Q(x, t)$ y $Z(x, t)$ a lo largo del canal al instante inicial $t = t_0$.

Las condiciones de frontera se definen al inicio y al final del canal. Generalmente, la condición de frontera aguas arriba se establece en la forma de un hidrograma de entrada del tipo $Q = f(t)$, el cual se puede linealizar fácilmente en la siguiente forma:

$$Q(t + \Delta t) - Q(t) = f(t + \Delta t) - f(t) \quad (5)$$

Este hidrograma corresponde a la integración de la demanda de riego en el periodo de programación de la distribución.

De manera similar, para la condición de frontera aguas abajo se define una función tabular del nivel del agua en alguna cota fija de descarga de la forma $Z = f(t)$, cuya expresión linealizada es la siguiente:

$$Z(t + \Delta t) - Z(t) = f(t + \Delta t) - f(t) \quad (6)$$

Así, en flujo subcrítico se debe resolver a cada paso de tiempo la matriz compuesta por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6. La inversión de esta matriz se facilita utilizando el método del doble barrido, pues se reducen el tiempo de cálculo y el espacio de memoria. En un primer barrido —efectuado de aguas arriba hacia aguas abajo— se obtiene una matriz tridiagonal. En un segundo barrido —efectuado de aguas abajo hacia aguas arriba— se invierte la matriz y se determinan los valores de las variables $Q(x, t)$ y $Z(x, t)$ (Liggett y Cunge, 1975).

En realidad, la formulación y el tratamiento de las condiciones de frontera externa al inicio y al final del canal

no presentan dificultades para su modelación. Sin embargo, la representación de las condiciones de frontera interna, es decir, de las represas que dividen al canal en tramos, requiere de consideraciones particulares. Las represas pueden estar operadas por vertedores y compuertas. En ambos casos, estas estructuras rompen la continuidad de las características geométricas e hidráulicas. En los sitios donde se ubican estas estructuras se deben introducir dos ecuaciones: una para asegurar la continuidad del caudal y otra para describir las características dinámicas de la estructura correspondiente. Para representar estas estructuras se agregan a la discretización del canal dos secciones de cálculo, una inmediatamente aguas arriba de la estructura y otra inmediatamente aguas abajo de la misma. Así, en los sitios donde se localizan estas estructura de control, las ecuaciones 3 y 4 toman la forma 7 y 8, respectivamente (Cunge, 1983):

$$\Delta Q_i = \Delta Q_{i+1} \quad (7)$$

$$\Delta Z_i = -\frac{\frac{\partial F}{\partial Q_i}}{\frac{\partial F}{\partial Z_i}} \Delta Q_{i+1} - \frac{\frac{\partial F}{\partial Z_{i+1}}}{\frac{\partial F}{\partial Z_i}} \Delta Z_{i+1} \quad (8)$$

La ecuación 7 expresa la continuidad, ya que la distancia entre las secciones i e $i+1$ es muy pequeña y por lo tanto el aporte lateral se considera despreciable y la transmisión del caudal, instantánea.

En la ecuación 8, la función F representa la ecuación dinámica de la estructura (vertedor, compuerta, etcétera), la cual, de manera general, se expresa en la siguiente forma para una altura de vertedor o abertura de compuerta dada:

$$F(Q_i, Z_i, Z_{i+1}) = 0 \quad (9)$$

donde:

Q_i = caudal en la estructura.

Z_i = nivel aguas arriba de la estructura.

Z_{i+1} = nivel aguas abajo de la estructura.

Si la descarga de la estructura es libre, se anula el último término del segundo miembro de la ecuación 8, pues el nivel aguas abajo no afecta el flujo en la estructura.

Cuando las estructuras permanecen estáticas, esta aproximación tangencial en cada paso de tiempo

proporciona una buena precisión del caudal; sin embargo, cuando se introducen variaciones temporales a la altura de los vertedores o a la abertura de las compuertas, se requiere de una forma de previsión de los niveles aguas arriba y aguas abajo para evaluar las derivadas de la ecuación 8 con respecto a los valores de Z_i y Z_{i+1} que se obtienen después de la maniobra de la estructura (De León, 1990).

Un modelo de Saint-Venant es fundamental para analizar y definir la dinámica del flujo del agua en canales de riego, así como para identificar parámetros y evaluar políticas de distribución de agua. Sin embargo, este modelo es muy exigente en información, ya que requiere de los valores del caudal y del nivel del agua (condiciones iniciales) en las secciones de cálculo en que se discretiza el canal. Esta situación limita su uso como herramienta para regular canales. En efecto, la modelación del flujo de agua en canales y la regulación de canales son problemas mutuamente inversos. En el primer caso se activa la fuente de abastecimiento y se analiza su efecto aguas abajo (difusión de la energía); mientras que en el segundo se parte de la demanda aguas abajo y se integra hasta la fuente de abastecimiento (recuperación de la energía).

Linealización de las ecuaciones de Saint-Venant

La estructura no lineal de las ecuaciones de Saint-Venant impide utilizar los métodos aplicables a los procesos lineales, es decir, aquellos donde la evolución del proceso se rige mediante ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes. Para salvar este problema es posible linealizar las ecuaciones 1 y 2, y simplificar la representación matemática del flujo del agua, a fin de poder aplicar las teorías de control de los procesos lineales.

Reddy *et al.* (1992) y Rogers y Goussard (1998) explican que en la regulación de los canales interesa conocer las variables de estado (caudal, tirante, velocidad, etcétera) en puntos precisos de los canales de distribución, como las represas, las tomas y las estaciones de bombeo. Los modelos tipo "función de transferencia" entre un cierto número de puntos de los canales permiten estimar estas variables. Tales funciones de transferencia se pueden obtener a partir de la ecuación de difusión (10):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \theta \frac{\partial Q}{\partial x} - E \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (10)$$

La ecuación 10 es una simplificación de las ecuaciones 1 y 2, donde se ha supuesto que el caudal lateral unitario

(q) es nulo y que los términos de inercia pueden ser despreciables en relación con los términos de frotamiento. Los coeficientes θ y E representan la convección y la difusión, respectivamente, y no son constantes; sin embargo, si la variación del caudal se produce de manera lenta en el transcurso del tiempo, estos dos parámetros pueden considerarse como constantes, lo cual permite una solución analítica de la ecuación 10. En efecto, mediante una transformación de Laplace se obtiene una función de transferencia entre el caudal en un punto de entrada $Q_e(P, 0)$ y el caudal observado $Q_s(P, X)$ en un punto situado aguas abajo a una distancia X .

$$\frac{Q_s(P, x)}{Q_e(P, 0)} = \text{EXP} \left[\frac{\theta x}{2E} \left(1 - \left(1 + \frac{4E}{\theta^2} P \right)^{1/2} \right) \right] \quad (11)$$

donde:

P = variable de Laplace.

En la ecuación 11, también conocida como modelo de Hayami, sólo interviene la distancia X que separa los puntos de interés para evaluar el caudal en dichos puntos. La forma exponencial de esta función de transferencia vuelve incómodo su uso en la elaboración de órdenes de control, por lo que a partir de esta expresión se prefirió identificar un modelo de segundo orden.

Identificación a un modelo de segundo orden

Cuando se estudia la regulación de un sistema, se busca representarlo mediante expresiones matemáticas bien conocidas, tales como las funciones de transferencia lineales. Además, esta representación matemática debe tener una buena aproximación del fenómeno físico que se estudia.

Piquereau (1980), Verdier (1986) Falvey (1977), De León (1986, 1987), González *et al.* (1999) y Brenes *et al.* (2000) señalan que un canal se comporta como un filtro que deja pasar las perturbaciones lentas, pero que amortigua las perturbaciones rápidas. Así, la función más simple que reúne estas propiedades es la función de transferencia de segundo orden, la cual se expresa por la ecuación 12:

$$F(P) = \frac{e^{-\tau P}}{\frac{P^2}{W^2} + \frac{2\delta}{W}P + 1} \quad (12)$$

donde:

W = frecuencia propia.

δ = amortiguamiento.

τ = retardo.

Clemmens *et al.* (1995, 1998) y Burt *et al.* (1998) señalan que en la práctica las maniobras de las estructuras de control no son ejecutadas de manera continua y son esencialmente discretas; por lo tanto, para la elaboración de controles interesa la expresión discretizada de la ecuación 12, la cual es función del amortiguamiento, de la frecuencia propia y del periodo de muestreo elegido. Su expresión se tiene en la ecuación 13:

$$F(Z) = Z^{-n} \frac{CZ^{-1} + DZ^{-2}}{1 - AZ^{-1} + BZ^{-2}} \quad (13)$$

donde:

$Z = e^{-\tau P}$.

T = periodo de muestreo.

n = entero más próximo de τ/T .

$C, D, A, B = f(\tau)$.

$C + D = 1 - A + B$.

Con esta función de transferencia como base del análisis del fenómeno de propagación de caudales, la elaboración de controles se compone de las siguientes fases:

- Previsión de la demanda de riego.
- Regulación en lazo abierto.
- Regulación en lazo cerrado.

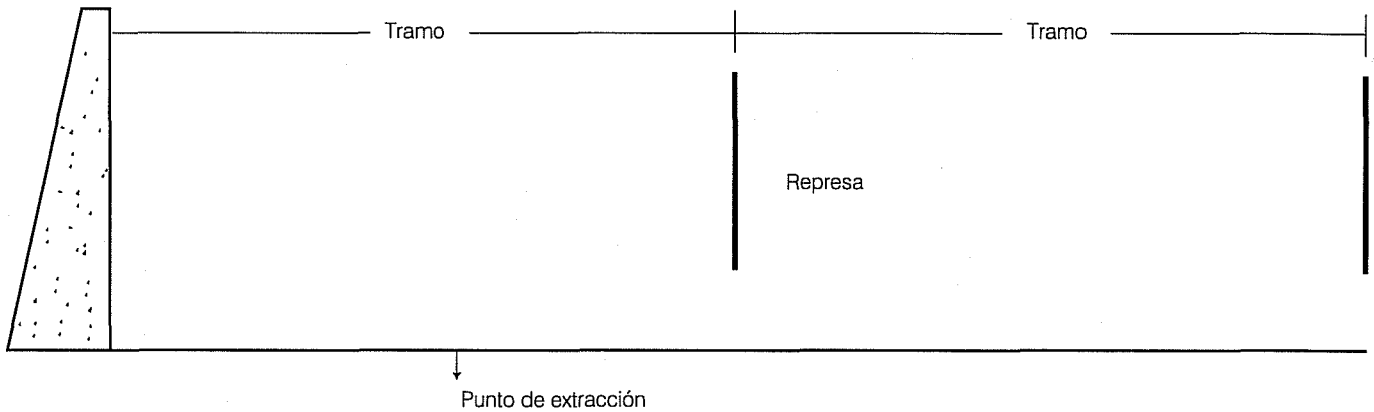
Estas fases se ejecutan sobre la modelación elegida del sistema.

Modelación del sistema

La elaboración de las órdenes de control en los diferentes puntos del canal se apoya sobre las funciones de transferencia entre los diferentes puntos particulares del canal y, a su vez, tales funciones de transferencia se determinan según la modelación del mismo.

El número de funciones de transferencia está ligado con la configuración física del canal y con la manera de representarla. En general, el sistema (canal) está dividido en subsistemas (tramos) por las represas (reguladores) (ilustración 1).

Ilustración 1. Elementos de canales de riego.



Cada regulador transfiere un caudal conocido de un tramo a otro, lo cual permite una dependencia determinista entre ellos, puesto que las perturbaciones que se presentan en un tramo no se propagan en los tramos aguas abajo mientras las compuertas no se maniobren. Por tanto, se puede establecer una regulación en cada tramo y repercutirla de aguas abajo hacia aguas arriba.

Los puntos particulares en cada tramo de canal son los siguientes:

- La entrada (represa aguas arriba del tramo).
- Los puntos de extracción (tomas laterales, tomas granja y estaciones de bombeo).
- La salida a punto de medida (represa aguas abajo del tramo).

Por lo tanto, en cada tramo de canal se deben identificar las funciones de transferencia F_1 , F_2 y F_3 , que se indican en la ilustración 2, de manera que en cada tramo se deben determinar:

$$NFT = 2 \cdot NPE + 1$$

donde:

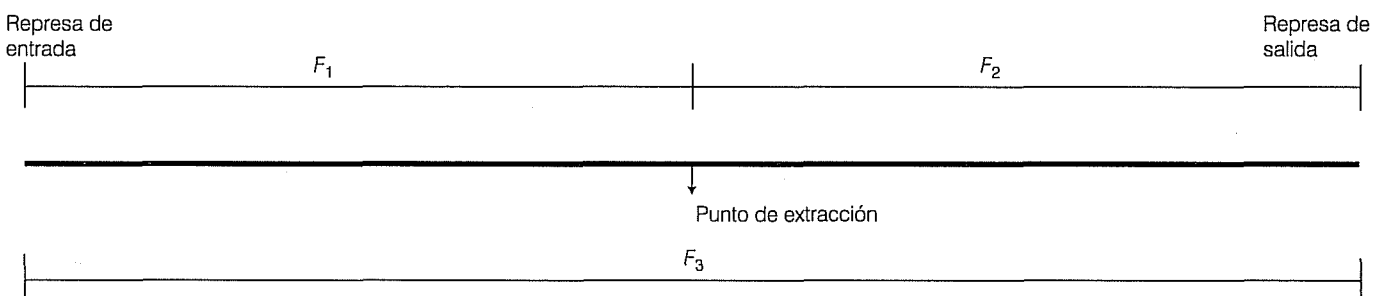
NFT = número de funciones de transferencia.

NPE = número de puntos de extracción (tomas laterales).

Ejemplo de aplicación

La metodología descrita en los incisos anteriores se aplicó en el diseño de un sistema de control automático del canal principal del distrito de riego 023 San Juan del Río, Querétaro. En el área dominada por este canal, la distribución se efectúa por demanda controlada en periodos de programación de una semana. La regulación del canal es por aguas arriba e inicia en la obra de toma de la fuente de alimentación, donde se controla la extracción al inicio del periodo de programación. Sobre el canal se localizan represas de control, las cuales se operan de manera manual cada vez que ocurren variaciones de los caudales de extracción.

Ilustración 2. Funciones de representación de cada tramo de canal.



Este distrito se abastece con dos presas de almacenamiento conectadas en serie de cincuenta y setenta millones de metros cúbicos y se complementa con cincuenta pozos profundos. La superficie regada es de 10,500 hectáreas con 3,000 usuarios. La conducción del agua se hace por medio de un canal principal a cielo abierto, con una capacidad máxima al inicio de 10 m³/s, la cual se reduce a 6 m³/s en el extremo final. El canal tiene una longitud de 25 km, los cuales están revestidos de concreto y mampostería en los primeros 17 km y los últimos 8 km están sin revestir. Las características hidráulicas y geométricas al inicio del canal son las siguientes:

Longitud	= 25 kilómetros	Pendiente	= 0.00022
Sección	= trapecial	Taludes	= 1.5:1
Caudal máximo	= 10 m ³ /s	Bordo libre	= 0.80 m
Tirante de diseño	= 2.30 m		
Plantilla	= 4.5 m		

Sobre el canal principal se sitúan nueve represas, 11 canales laterales, 12 pozos profundos que bombean al canal principal y varias tomas directas. La configuración hidráulica del canal principal se muestra en la ilustración 3. En el cuadro 1 se tienen la longitud y los caudales de operación del canal principal.

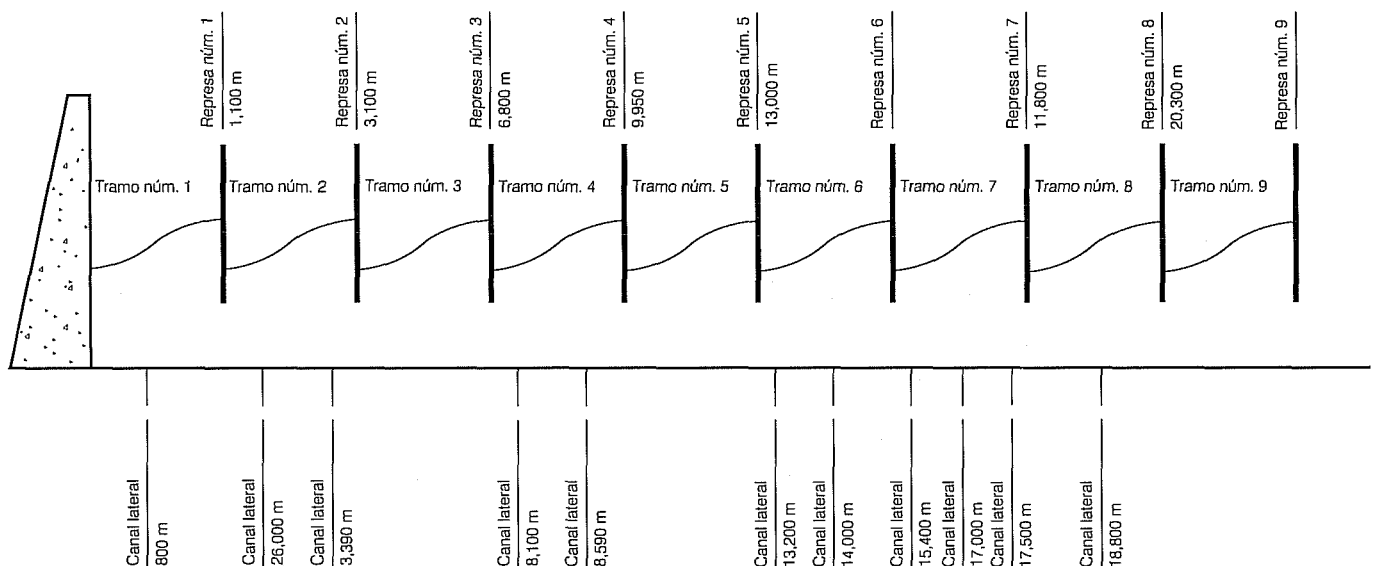
En este canal se realizaron mediciones de caudales y niveles en los diferentes tramos del canal principal y de las aberturas de las compuertas de control ubicadas en

las represa (cuadro 2). Con estas mediciones y la geometría del canal se calibró el modelo de flujo transitorio denominado *SIRENE*, el cual fue desarrollado por Baume y Poirson (1984) y adaptado por De León (1986) para considerar controladores dinámicos en los canales. Con base en este modelo se identificaron los parámetros de convección y difusión del modelo de Hayami, la dinámica de propagación de caudales y las funciones de transferencia entre los diferentes tramos del canal. El retardo entre los diferentes tramos de canal varió entre diez y treinta minutos.

Cuadro 1. Longitud de los tramos del canal principal.

Tramo	Estructura de control	Distancia (km)	Caudal (m ³ /s)
1	Presa	0.00	10.00
2	Represa 1	1.10	7.25
3	Represa 2	3.10	4.28
4	Represa 3	6.80	3.50
5	Represa 4	9.95	2.35
6	Represa 5	13.00	1.96
7	Represa 6	15.00	0.36
8	Represa 7	17.80	0.36
9	Represa 8	20.30	0.36
	Represa 9	22.00	0.36

Ilustración 3. Configuración del canal principal de San Juan del Río, Querétaro.



Cuadro 2. Características hidráulicas de las represas del canal principal.

Represa	Caudal (m ³ /s)	Tirante aguas arriba (m)	Tirante aguas abajo (m)	Abertura (m)	Ancho (m)
1	7.250	2.29	2.02	1.32	4.50
2	4.280	1.84	1.70	1.21	4.50
3	3.500	1.89	1.30	0.43	4.50
4	2.350	1.15	1.03	0.65	4.50
5	1.960	1.02	0.82	0.35	4.50
6	0.360	1.05	0.30	0.04	4.50
7	0.360	1.05	0.30	0.04	4.50
8	0.360	1.05	0.30	0.04	4.50
9	0.360	1.05	0.30	0.04	4.50

Cálculo de la regulación

El esquema general de la regulación se muestra en la ilustración 4. Como se indicó anteriormente, la regulación del canal principal considera las siguientes etapas:

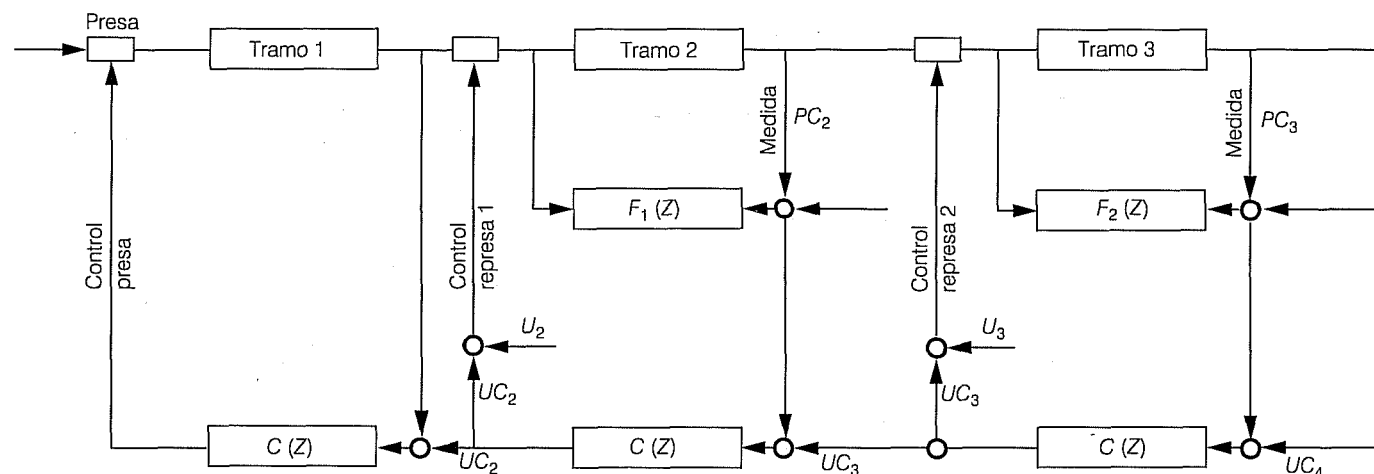
- Previsión de la demanda de riego.
- Control en lazo abierto.
- Control en lazo cerrado.

Previsión de la demanda de riego

La regulación de canales es un problema típico de un sistema de seguimiento de una referencia variable en el

tiempo. En este caso, la referencia corresponde a la demanda de riego, la cual varía diariamente en función del clima, tipo de suelo, la etapa vegetativa y manejo de los cultivos. El pronóstico de la demanda de riego en los puntos de control requiere determinar la evapotranspiración de referencia (ETo), el coeficiente de cultivo (Kc) y el contenido de humedad en el suelo. Afortunadamente, la tecnología desarrollada durante la última década permite el monitoreo de las variables del sistema suelo-planta-atmósfera mediante estaciones agroclimáticas y los sistemas de reflectometría. En México se ha aplicado el pronóstico de riego para estimar la lámina y el momento de riego en los distritos de riego de El Fuerte, de El Carrizo y Culiacán, Sinaloa, de Santo Domingo, Baja California Sur, y de Apatzingán, Michoacán (Ojeda, 1999).

Ilustración 4. Esquema de regulación del caudal.



Control en lazo abierto

Conociendo la demanda de riego de las tomas laterales (mediante la previsión), el problema consiste en enviar el agua necesaria en cada represa para satisfacer las necesidades de las tomas laterales aguas abajo. Este control trata de satisfacer las necesidades de riego estimadas a partir de la previsión de la demanda, de manera que en cada tramo del canal se tiene:

$$U_j = \sum_{i=1}^{NTL(j)} F^{-1}(Z) i Q P_i \quad (14)$$

donde:

U_j = control en lazo abierto sobre el tramo j .
 NTL = número de tomas laterales en el tramo j .

$C(Z) = F(Z)^{j-1}$ función de transferencia entre la entrada al tramo j y la toma lateral i .

Q_{pi} = previsión de la demanda en la toma lateral i .

El control global en lazo abierto es:

$$U = \sum_{j=1}^n U_j$$

donde n es el número de tramos de canal.

El control final en lazo abierto de todos los tramos corresponde a una modelación en paralelo, ya que es la suma de los controles elementales de cada canal lateral. En el cuadro 3 se muestran las funciones de transferencia entre las represas aguas arriba de cada tramo y las tomas laterales ubicadas en el tramo.

Las funciones de transferencia entre cada punto de extracción y la salida del tramo se muestran en el cuadro 4.

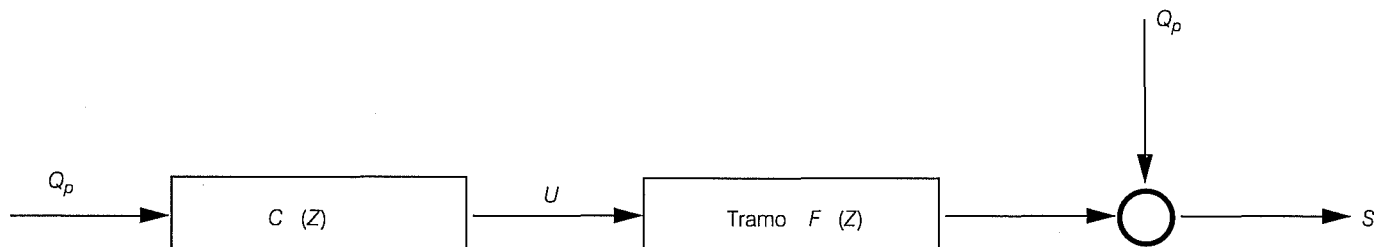
Cuadro 3. Función de transferencia entre represas y tomas laterales.

Entrada	Punto de extracción	W_n	δ	$F(Z)$
Presa	Toma lateral 00 + 800	5.445	1.399	$\frac{0.877 Z^{-1} + 0.022 Z^{-2}}{1 - 0.101 Z^{-1}}$
Represa 1	Toma lateral 03 + 390	4.142	1.648	$\frac{0.722 Z^{-1} + 0.032 Z^{-2}}{1 - 0.247 Z^{-1}}$
Represa 1	Toma lateral 02 + 600	5.625	1.576	$\frac{0.847 Z^{-1} + 0.020 Z^{-2}}{1 - 0.134 Z^{-1}}$
Represa 3	Toma lateral 08 + 100	3.889	1.475	$\frac{0.746 Z^{-1} + 0.040 Z^{-2}}{1 - 0.214 Z^{-1}}$
Represa 3	Toma lateral 08 + 590	4.276	1.838	$\frac{0.691 Z^{-1} + 0.027 Z^{-2}}{1 - 0.282 Z^{-1}}$
Represa 5	Toma lateral 13 + 103	6.755	0.938	$\frac{0.998 Z^{-1} + 0.005 Z^{-2}}{1 - 0.002 Z^{-1}}$
Represa 5	Toma lateral 14 + 000	4.472	1.531	$\frac{0.780 Z^{-1} + 0.030 Z^{-2}}{1 - 0.190 Z^{-1}}$
Represa 6	Toma lateral 15 + 400	5.589	1.267	$\frac{0.915 Z^{-1} + 0.020 Z^{-2}}{1 - 0.065 Z^{-1}}$
Represa 6	Toma lateral 17 + 000	2.894	1.539	$\frac{0.602 Z^{-1} + 0.054 Z^{-2}}{1 - 0.344 Z^{-1}}$
Represa 6	Toma lateral 17 + 500	3.978	2.308	$\frac{0.575 Z^{-1} + 0.022 Z^{-2}}{1 - 0.403 Z^{-1}}$
Represa 7	Toma lateral 18 + 800	5.045	1.803	$\frac{0.761 Z^{-1} + 0.022 Z^{-2}}{1 - 0.217 Z^{-1}}$

Cuadro 4. Función de transferencia entre la extracción y la salida del tramo.

Punto de extracción	Salida	Wn	δ	$F(Z)$
Toma lateral 00 + 800	Represa 1	5.035	1.439	$\frac{0.860 Z^{-1} + 0.023 Z^{-2}}{1 - 0.117 Z^{-1}}$
Toma lateral 02 + 600	Represa 2	4.804	1.513	$\frac{0.810 Z^{-1} + 0.027 Z^{-2}}{1 - 0.163 Z^{-1}}$
Toma lateral 03 + 390	Represa 2	5.717	1.071	$\frac{0.963 Z^{-1} + 0.017 Z^{-2}}{1 - 0.020 Z^{-1}}$
Toma lateral 08 + 100	Represa 4	3.162	1.465	$\frac{0.660 Z^{-1} + 0.053 Z^{-2}}{1 - 0.288 Z^{-1}}$
Toma lateral 08 + 590	Represa 4	4.624	1.717	$\frac{0.747 Z^{-1} + 0.026 Z^{-2}}{1 - 0.226 Z^{-1}}$
Toma lateral 13 + 100	Represa 6	3.910	1.880	$\frac{0.646 Z^{-1} + 0.029 Z^{-2}}{1 - 0.324 Z^{-1}}$
Toma lateral 15 + 400	Represa 7	2.696	1.600	$\frac{0.557 Z^{-1} + 0.054 Z^{-2}}{1 - 0.389 Z^{-1}}$
Toma lateral 17 + 000	Represa 7	5.468	1.659	$\frac{0.820 Z^{-1} + 0.020 Z^{-2}}{1 - 0.160 Z^{-1}}$
Toma lateral 17 + 500	Represa 7	4.461	1.007	$\frac{0.935 Z^{-1} + 0.040 Z^{-2}}{1 - 0.026 Z^{-1}}$
Toma lateral 18 + 800	Represa 9	3.826	1.893	$\frac{0.635 Z^{-1} + 0.030 Z^{-2}}{1 - 0.335 Z^{-1}}$

Ilustración 5. Control en lazo abierto.



Control en lazo cerrado

El control en lazo abierto es tal que efectúa una corrección en función de la previsión de la demanda de riego Q_{pi} . El control en lazo cerrado permite corregir los errores de previsión, las perturbaciones naturales de los canales y los errores debidos a la modelación. Esta corrección se efectúa en función del caudal real en los puntos de medida en los diferentes tramos del canal y del caudal de referencia.

El caudal de referencia en un tramo i debe satisfacer:

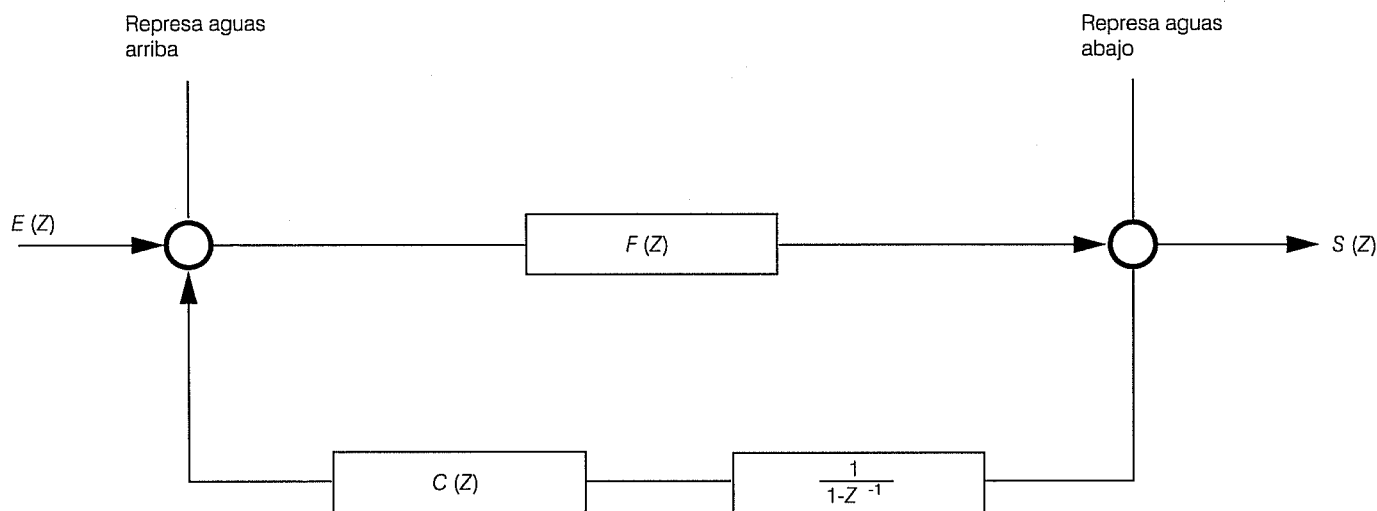
- Las necesidades de la demanda de riego de los tramos aguas abajo (U).
- Los caudales necesarios para corregir las perturbaciones aguas abajo (UC).

De manera que se tiene:

$$Q_i = \sum_{i=i+1}^n U_i + \sum_{i=i+1}^n UC_i \quad (15)$$

El diagrama de bloque de cada tramo de canal se presenta en la ilustración 6:

Ilustración 6. Control en lazo cerrado.



En general, se debe determinar un corrector numérico de un sistema discreto cuya función de transferencia en lazo abierto está representada por una fracción racional en Z^{-1} .

$$F(Z) = \frac{N1(Z)}{D1(Z)} = \frac{C1Z^{-1} + C2Z^{-2} + \dots}{1 + A1Z^{-1} + A2Z^{-2} + \dots} \quad (16)$$

Se supone que la entrada no tiene efecto inmediato sobre la salida, lo cual indica que no hay término constante en el numerador. En el cuadro 5 se muestran las funciones de transferencia entre la entrada y la salida de cada tramo de canal.

La expresión del corrector $C(Z)$ es de la forma:

$$C(Z) = \frac{N2(Z^{-1})}{D2(Z^{-1})} = \frac{\sum_{i=0}^m \alpha_i Z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i Z^{-i}} \quad (17)$$

donde:

n = grado de $(N1) - 1$.

m = grado de $(D1)$.

En el caso del distrito de riego 023 de San Juan del Río se eligió un periodo de muestreo de una hora. Ya que el sistema de control considera una fase de previsión de

la demanda de riego, la frecuencia de las perturbaciones puede variar entre una y dos horas, y la dinámica de las propagación puede modificarse entre 15 y 60 minutos en todos los tramos del canal. Con este valor se establece un buen balance entre la validez de la representación discreta y las restricciones de aplicación del control en tiempo real. El valor del coeficiente B de la ecuación 13 es inferior a $2 \cdot 10^{-4}$, por lo que se consideró nulo. Por otra parte, debido a que el retardo es inferior al periodo de muestreo, la expresión del corrector para los diferentes tramos es:

$$C(Z) = \frac{1 - AZ^{-1}}{1 + (D-1)Z^{-1} - DZ^{-2}} \quad (18)$$

donde A y D son los parámetros determinados en la función de transferencia en lazo abierto. En el cuadro 6 se presentan las expresiones de los correctores de cada tramo de canal.

Este procedimiento de regulación se probó para un escenario que se presenta con bastante frecuencia en las condiciones reales de operación de los canales; se trata de la suspensión del riego en el tramo seis durante la noche y el reinicio del riego al día siguiente. El caudal de consumo en el tramo seis es de 1,600 l/s. En la ilustración 7 se observa la corrección del caudal en la compuerta cinco, situada aguas arriba del tramo seis, donde se produce la interrupción del riego, en la cual el caudal se reduce al mínimo necesario (360 l/s) para abastecer la demanda aguas abajo del tramo seis. Esta corrección

Cuadro 5. Función de transferencia de los tramos de canal.

Entrada	Salida	Wn	δ	F(Z)
Presa	Represa 1	3.562	1.394	$\frac{0.730 Z^{-1} + 0.048 Z^{-2}}{1 - 0.222 Z^{-1}}$
Represa 1	Represa 2	3.656	1.608	$\frac{0.682 Z^{-1} + 0.039 Z^{-2}}{1 - 0.279 Z^{-1}}$
Represa 2	Represa 3	3.129	1.877	$\frac{0.558 Z^{-1} + 0.037 Z^{-2}}{1 - 0.405 Z^{-1}}$
Represa 3	Represa 4	2.208	1.436	$\frac{0.512 Z^{-1} + 0.077 Z^{-2}}{1 - 0.413 Z^{-1}}$
Represa 4	Represa 5	3.056	1.935	$\frac{0.537 Z^{-1} + 0.036 Z^{-2}}{1 - 0.427 Z^{-1}}$
Represa 5	Represa 6	3.824	1.907	$\frac{0.632 Z^{-1} + 0.037 Z^{-2}}{1 - 0.339 Z^{-1}}$
Represa 6	Represa 7	2.816	1.818	$\frac{0.528 Z^{-1} + 0.042 Z^{-2}}{1 - 0.430 Z^{-1}}$
Repesa 7	Represa 8	2.786	1.777	$\frac{0.532 Z^{-1} + 0.044 Z^{-2}}{1 - 0.424 Z^{-1}}$
Represa 8	Represa 9	2.478	1.348	$\frac{0.586 Z^{-1} + 0.078 Z^{-2}}{1 - 0.337 Z^{-1}}$

Cuadro 6. Correctores de los tramos de canal.

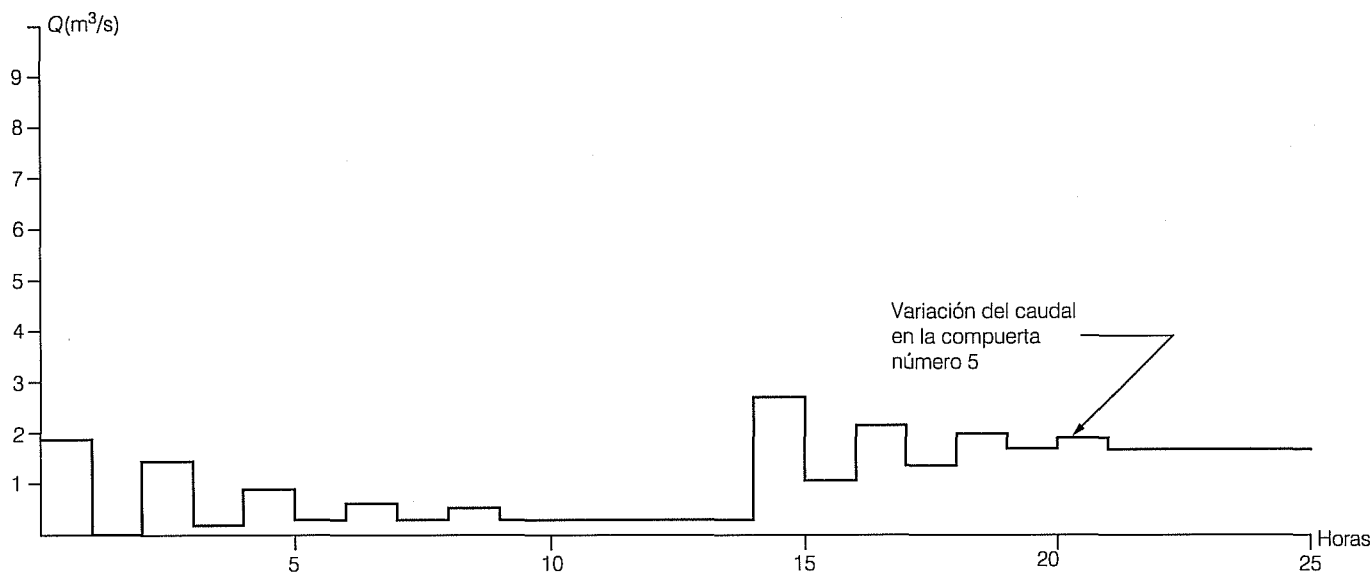
Entrada	Salida	C(Z)
Presa	Represa 1	$\frac{1 - 0.222 Z^{-1}}{1 - 0.952 Z^{-1} - 0.048 Z^{-2}}$
Represa 1	Represa 2	$\frac{1 - 0.279 Z^{-1}}{1 - 0.961 Z^{-1} - 0.039 Z^{-2}}$
Represa 2	Represa 3	$\frac{1 - 0.405 Z^{-1}}{1 - 0.963 Z^{-1} - 0.037 Z^{-2}}$
Represa 3	Represa 4	$\frac{1 - 0.411 Z^{-1}}{1 - 0.923 Z^{-1} - 0.077 Z^{-2}}$
Represa 4	Represa 5	$\frac{1 - 0.427 Z^{-1}}{1 - 0.964 Z^{-1} - 0.036 Z^{-2}}$
Represa 5	Represa 6	$\frac{1 - 0.339 Z^{-1}}{1 - 0.970 Z^{-1} - 0.030 Z^{-2}}$
Represa 6	Represa 7	$\frac{1 - 0.430 Z^{-1}}{1 - 0.958 Z^{-1} - 0.0342 Z^{-2}}$
Repesa 7	Represa 8	$\frac{1 - 0.424 Z^{-1}}{1 - 0.956 Z^{-1} - 0.044 Z^{-2}}$
Represa 8	Represa 9	$\frac{1 - 0.336 Z^{-1}}{1 - 0.992 Z^{-1} - 0.078 Z^{-2}}$

se repercute hacia aguas arriba hasta llegar a la presa y el caudal en tránsito se almacena en los diferentes tramos del canal. Es este almacenamiento lo que permite al día siguiente el reinicio del riego en ese mismo tramo. Es importante resaltar que las pérdidas de agua se reducen gracias a la supervisión continua del estado hidráulico del canal y de las extracciones, lo cual hace suponer que las estructuras deben estar instrumentadas para medir niveles, aberturas y caudales, y transmitir información a los centros de control. Afortunadamente, durante los últimos diez años se han desarrollado y probado sistemas para la instrumentación de canales de riego adaptados a las condiciones técnicas y económicas de los distritos de riego de México.

Conclusiones

La metodología de regulación que aquí se discute es fácilmente adaptable a la configuración física de la red de canales de los distritos de riego de México y representa una posibilidad para reducir las pérdidas de agua debidas a la operación, así como para adecuar los programas de distribución de agua a las necesidades de riego de los cultivos.

Ilustración 7. Variación del caudal en la compuerta cinco.



La representación y la modelación de los diferentes tramos del canal puede modificarse con sólo cambiar los parámetros de las funciones de transferencia, lo cual permite adaptar la regulación a las modificaciones, siempre posibles, de la infraestructura física y a la evolución de las políticas de operación.

Recibido: 01/04/2002

Aprobado: 21/06/2002

Referencias

- Brenes, G.A., M.B. de León, C.V. Ruiz y P.L. Rendón, "Sistema de control adaptable para la regulación de canales de riego", *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XV, núm. 1, 2000, pp. 63-72.
- Baume y Poirson, "Modelisation numerique d'un ecoulement dans un reseau hydraulique a surface libre", *La Houille Blanche*, vol. 1, núm. 2, Francia, 1984.
- Burt, C.M., R.S. Mills, R.D. Khalsa y V. Ruiz, "Improved Proportional-Integral (PI) Logic for Canal Automation", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, núm. 1, enero-febrero, 1998.
- Clemmens, M., C.M. Burt y M. Rogers, "Introduction to Canal Control Algorithm Needs", *Procedures of the Water Resources Engineering Conference*, ASCE, San Antonio, Estados Unidos, 1995.
- Clemmens, A., T. Kacerek, B. Grawitz y W. Schuurmans, "Test Cases for Canal Control Algorithms", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, núm. 1, enero-febrero, 1998.
- Cunge, A., *Applied Mathematical Modeling of Open Channel Flow*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 1975.
- Cunge, A., *Simulation des ecoulements non permanents dans les rivières et canaux*, Ecole Nationale Supérieure d'hydraulique de Grenoble Francia, 1983.
- De León, B. y V. E. Palacios, "Modelo digital para programar la distribución del agua en los distritos de riego", *Agrociencia*, núm. 45, México, 1980.
- De León, B., "Prise en compte des vannes de regulation dans un modèle de simulation d'un canal de transport et distribution d'eau", *XVI Journées Regionales Européenne de la ICID*, Murcia, España, 1986.
- De León, B., "Sistematización de la regulación de canales de riego", *Memorias del III Congreso Nacional de Irrigación*, Los Mochis, Sinaloa, México, 1987.
- De León, B., "Tratamiento de las condiciones de frontera en un modelo de flujo no permanente en canales de riego", *Congreso Nacional de Hidráulica*, Zacatecas, Zacatecas, México, 1990.
- Falvey, "Frequency-Response Analysis of Automated Canals", Bureau of Reclamation, Denver Colorado, 1977.
- González, T.J., M.B. De León, C.V. Ruiz y P.L. Rendón, "Sistema de regulación de canales en el distrito de riego de la Begoña, Guanajuato", *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 14, núm. 2, 1999, pp. 11-20.
- Liggett, A. y A. Cunge, *Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 1975.

- Mejía, S.E., M.B. De León, P.L. Rendón, V.O. Palacios y R.B. Cuevas, "Adaptación de un modelo de simulación en régimen no permanente", *Agrociencia*, vol. 31, núm.1, México, 1997.
- Ojeda, B.W., *Pronóstico de riego en tiempo real*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, 1999.
- Piquereau, *Gestion automatique des eaux détiage*, Centre d'Etudes et de Recherche de Toulouse, 1980.
- Pochat, R., *Eculement a surface libre*, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forests, Montpellier, 1983.
- Reddy, J.M., A. Dia y A. Oussou, "Design of Control Algorithm for Operation of Irrigation Canals", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 118, núm. 6, noviembre-diciembre, 1992.
- Rogers, D. y J. Goussard, "Canal Control Algorithms Currently in Use", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, núm. 1, enero-febrero, 1998.
- Verdier, *Information de la commande du transport et de la distribution de eau d'irrigation*, Commission Internatoinale des Irrigations et du Drainage, Murcia, 1986.

Abstract

De León Mojarro, B., J. Verdier, A. Piquereau, V. Ruiz Carmona & L. Rendón Pimentel, "Control of an Irrigation Canal Network", Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish), vol. 17, no. 4, pages 21-35, October-December, 2002.

In Mexico, the largest share of the nation's agricultural production comes from agricultural zones designated as irrigation districts and units. Increasingly limited availability and competition for water have made it necessary to implement integrated technification programs, in order to improve both efficiency of water use and productivity in these zones. Through these programs, over the past 7 years, roughly 700,000 hectares have benefited from high- and low-pressure irrigation systems. Additionally, in several irrigation districts, collective low-pressure networks have been built on surfaces ranging from 500 to 4,000 hectares. This transformation in small parcel irrigation systems and interparcel distribution now demands a corresponding change in the control of main canals, in order to provide users with irrigation services in a flexible, reliable, equitable, and efficient manner. In many areas of the country, the secondary canals have been substituted by collective low-pressure networks and pumping stations when the head in the main canals has been small. The control of irrigation canals consists of optimizing the conveyance and distribution process to satisfy the evapotranspiration demands of the crops in an irrigation district. This optimization implies the application of gate operation controls to adapt the transport and distribution of water in the canal to the volumes extracted through the laterals. Although the control of canals can be viewed from different perspectives, the proposed method is easily adapted to canal networks with configurations that vary over time. In fact, the general rationale used to model the canals, determine and identify the parameters, and prepare the control commands, can be applied to most open channel networks. The results of this work lead to the conclusion that the application of the control theory to the control of canals is an alternative that will reduce water losses and improve irrigation services in the irrigation districts.

Keywords: control of canals, control algorithms.

Dirección institucional de los autores:

*Benjamín de León Mojarro
Victor Ruiz Carmona*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
Progreso, Jiutepec, Morelos
C.P. 62550
México.

Jean Verdier

Centre Nationale du Genie Rural des Eaux et des Forêts
Montpellier, France.

Alan Piquereau

Centre d'Etudes et de Recherche de Toulouse, France.

Luis Rendón Pimentel

Comisión Nacional del Agua,
Insurgentes Sur 1960,
México, D.F., México.