

CONTROL DE NIVELES DE AGUA EN CANALES DE RIEGO

Julia V. Martorana^a, Víctor H. Cortínez^{a,b}

^a*Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional (FRBB), 11 de Abril 461, 8000, Bahía Blanca, Buenos Aires, vcortine@frbb.utn.edu.ar*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)*

Palabras Clave: Canales, Control, Optimización, PID.

Resumen. En este trabajo se propone una metodología para el control de niveles de agua en canales de riego. El problema del diseño de la estrategia óptima para el manejo de compuertas en canales se plantea en dos partes. Primero se obtiene la configuración de aperturas que brinda el estado estacionario deseado y luego se determina la secuencia de movimientos necesaria para llevar al canal a ese estado. Por otra parte se analiza el comportamiento de un controlador PI para minimizar fluctuaciones inesperadas en los niveles de agua del canal. Para su resolución, se propone un enfoque de control óptimo basado en la combinación de un simulador de las ecuaciones de Saint Venant con un método de optimización denominado “Método de Recocido Simulado”.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, el agua constituye un recurso escaso en varios países del mundo. El incremento de la población y la contaminación producida por el hombre han aumentado la demanda de este recurso. Por esto motivo, resulta cada vez más importante el estudio de las infraestructuras adecuadas para su almacenamiento, transporte y gestión.

En los sistema de irrigación mediante canales a cielo abierto, se producen pérdidas por infiltración, evaporación y además, por operaciones de control ineficientes. Las pérdidas producidas durante las operaciones de compuertas del canal se deben a la dificultad para suministrar en forma precisa los caudales deseados. Estos caudales derivados, dependen del nivel de agua en las posiciones de las salidas laterales, los que a la vez se encuentran condicionados por las posiciones de las compuertas transversales. De esta forma, para realizar una variación en los caudales laterales, se requiere una modificación de las posiciones de las compuertas transversales del canal.

Por lo tanto, para realizar una correcta operación del canal, es necesario conocer el comportamiento del mismo durante los estados transitorios provocados por los movimientos de las compuertas. En este sentido, la simulación computacional basada en un modelo hidrodinámico adecuado, se ha convertido en una técnica muy conveniente para la determinación de protocolos de manejo de compuertas de canales de riego.

Dentro de las operaciones que pueden llevarse a cabo para transportar agua en un canal, se pueden mencionar aquellas destinadas a modificar los caudales en una o varias derivaciones laterales y aquellas que tienen como objetivo mantener constante determinados estados estacionarios. Durante el primer tipo de maniobras se requiere que el estado de transición que se provoca en el canal permanezca el menor tiempo posible y que las oscilaciones de niveles de agua que se producen, no sean significativas para evitar déficit y excesos de caudal en las entregas. En el segundo caso, se pretende que una vez logrado el estado deseado, éste permanezca invariable ante cualquier perturbación imprevista que puede ser ocasionada por la apertura de una compuerta lateral adicional o por la variación de los niveles de agua externos.

Para llevar a cabo la modificación de las entregas laterales es necesario efectuar determinadas aperturas o cierres en las compuertas transversales. El problema consiste entonces, en establecer la manera óptima de operar las compuertas a los efectos de minimizar la diferencia de tirantes con respecto a los deseados en los puntos donde se ubican las derivaciones laterales. Se trata de un problema de control óptimo de lazo abierto donde las variables a determinar son las posiciones de las compuertas.

En el caso del control de perturbaciones de niveles de agua, el problema se formula como uno de control automático realimentado. El esquema de control utilizado en esta oportunidad, es una simplificación del control PID. La eficiencia de este tipo de controlador depende de la adecuada calibración de sus constantes.

En el presente trabajo se resuelven ambos problemas de forma unificada como un problema de optimización no lineal que pretende minimizar la distancia entre los valores de tirantes en determinados puntos del canal. En el primer caso, se determinan las posiciones de las compuertas como una función temporal para dos posibles casos de protocolos de manejo del canal: 1) mediante movimientos simultáneos de las compuertas o 2) por medio de movimientos sucesivos de las aperturas. Para el segundo caso, el problema de optimización se plantea para establecer las ganancias óptimas del controlador.

El problema se resuelve mediante una combinación de un método de simulación basado en las ecuaciones de Saint-Venant que describen la dinámica de un canal junto con un enfoque de optimización estocástica denominado "Recocido Simulado". La metodología propuesta se implementó computacionalmente en el ambiente de programación MATLAB. Se muestra que

tal enfoque resulta preciso y a la vez eficiente desde el punto de vista computacional. Es importante mencionar que este esquema es útil para la calibración de parámetros del modelo como, por ejemplo, para la determinación del coeficiente de rugosidad del canal. (Martorana y Cortínez, 2011)

2 ECUACIONES GOBERNANTES

El modelo de simulación utilizado se basa en el sistema de ecuaciones de Saint Venant. Este sistema está formado por dos ecuaciones diferenciales parciales no lineales del tipo hiperbólico que describen la dinámica del flujo unidimensional no permanente de aguas superficiales. Estas ecuaciones resultan de los principios de conservación de la masa y del momento:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f - gAS_0 = 0 \quad (2)$$

donde $A(x,t)$ (m^2) es la sección del canal; $Q(x,t)$ (m^3/s) es el caudal; $y(x,t)$ (m) es la profundidad del flujo; S_f es la pendiente de fricción; S_0 es la pendiente de fondo del canal; x (m) es la distancia a lo largo del canal; t (s) es el tiempo y g (m^2/s) es la aceleración de la gravedad.

Las condiciones iniciales se plantean como: $y(x,0) = y_0(x)$; $Q(x,0) = Q_0(x)$.

2.1 Ecuaciones de compuertas transversales y laterales

Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales parciales, se precisan dos condiciones de borde. En este caso, las condiciones en ambos extremos se plantean como relaciones entre el tirante y el caudal establecidas mediante ecuaciones de compuertas esclusas. Además, el flujo a través de estructuras hidráulicas tales como compuertas transversales, que se encuentran localizadas dentro del canal, no puede ser simulado con las expresiones (1) y (2)

Para estas condiciones se plantea la siguiente expresión:

$$Q = Cd \cdot a \cdot b \sqrt{2g(y_{US} - y_{DS})} \quad (3)$$

donde Cd es el coeficiente de compuerta, a (m) es el ancho de la compuerta; b (m) es la apertura de la compuerta e y (m) la altura de pelo de agua. Los subíndices US y DS corresponden a las posiciones aguas arriba y aguas abajo respectivamente respecto de la posición de la compuerta.

3 OPTIMIZACIÓN DEL MANEJO DE COMPUERTAS

El problema del diseño de la estrategia óptima para el manejo de compuertas se plantea en principio, dividido en dos partes. Primero se realiza la estimación de las aperturas de compuertas correspondientes al estado estacionario final que desea lograrse y luego se determina la secuencia de movimientos de compuertas necesaria para llevar el canal al nuevo estado estacionario, minimizando las fluctuaciones originadas por las variaciones de aperturas en las compuertas transversales.

3.1 Optimización de la operación de compuertas en estado estacionario

Para satisfacer los cambios de demandas de caudal en los canales secundarios es necesario modificar el estado del canal principal con el objetivo de entregar los valores de caudal deseados. Los caudales derivados a través de las compuertas laterales dependen de los tirantes de agua en las posiciones donde se encuentran dichas derivaciones. Estos tirantes de agua pueden ser modificados mediante la variación de las aperturas de las compuertas transversales ubicadas a lo largo del canal.

Por lo tanto, para realizar una variación en las entregas de caudal laterales, es necesario conocer para cada patrón de demanda, la configuración de aperturas de las compuertas transversales del canal que producen ciertas erogaciones. Entonces, para cumplir con determinadas entregas es necesario conocer el estado final de las compuertas transversales. Estas aperturas de compuertas pueden ser obtenidas mediante la resolución simultánea de las ecuaciones de compuertas y la ecuación de flujo gradualmente variado. Para este caso en particular, se resolvió el sistema de ecuaciones de Saint Venant junto con las ecuaciones de compuertas hasta alcanzar un estado de flujo estacionario.

Este problema se formuló como una optimización donde las variables a determinar son las aperturas finales de las compuertas transversales del canal. La función objetivo se plantea como el error cuadrático medio entre los caudales necesarios en las salidas laterales y los caudales erogados obtenidos con una determinada configuración de posiciones de compuertas transversales.

$$b_i = \arg \min G(b_i)$$

$$G(b_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^a \left(\frac{Q_s(x_i) - Q_m(x_i)}{Q_m(x_i)} \right)^2}{a}} \quad (4)$$

donde Q_s (m^3/s) es el caudal erogado por las compuertas laterales; Q_m (m^3/s) es el caudal lateral necesario y a es la cantidad de salidas laterales.

3.2 Optimización de la operación de compuertas en estado transitorio

Una vez establecida la configuración de posiciones de compuertas que produce el estado final deseado, es decir, que posibilita la salida de los caudales demandados, se determina la sucesión temporal de movimientos de compuertas que deben llevarse a cabo para conducir el canal de un estado inicial determinado al estado final deseado.

Para llevar el canal al estado final y posibilitar así la entrega de los caudales laterales necesarios, será necesario llevar a cabo una sucesión de movimientos en las compuertas transversales del canal. Este esquema de movimientos se establece mediante intervalos de apertura constante cuyas alturas de compuertas son las variables a determinar.

En este caso se proponen dos esquemas de movimientos. El primer esquema consiste en realizar determinada cantidad de movimientos de las compuertas durante cierta cantidad de tiempo y simultáneamente en las cuatro compuertas manejadas para este fin. Este caso correspondería a movimientos llevados a cabo en un canal equipado con dispositivos de telemetría para la operación a distancia de las compuertas. El segundo método reside en llevar a cabo los movimientos de las compuertas en forma sucesiva a medida que un operador recorre el canal en determinados intervalos de tiempo.

Ambas configuraciones de movimientos se establecen con el fin de evitar pérdidas y excesos durante la transición entre los estados del canal. Se determinan así, las alturas de compuertas necesarias en cada movimiento y en cada intervalo de tiempo de la transición.

Este problema se plantea como una optimización cuyas variables a determinar son las aperturas sucesivas necesarias para modificar el caudal derivado por las compuertas laterales. La función objetivo se plantea como el error cuadrático medio entre los valores de caudales laterales necesarios y los valores obtenidos con cada serie temporal de aperturas de compuertas. Es decir:

$$b_i = \arg \min H(b_i)$$

$$H(b_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^M \left(\frac{Q_s(i, j) - Q_m(i, j)}{Q_m(i, j)} \right)^2}{a.M}} \quad (5)$$

donde Q_s (m^3/s) es el caudal erogado por las compuertas laterales; Q_m (m^3/s) es el caudal lateral necesario; a es la cantidad de salidas laterales y M es la cantidad de mediciones temporales de los caudales laterales.

4 CONTROL DE NIVELES DE AGUA

Luego de la determinación del estado estacionario final deseado y del establecimiento del mismo mediante la sucesión de aperturas de compuertas, se pretende mantener este estado ante perturbaciones imprevistas tales como el cerramiento o apertura de derivaciones intermedias, perturbaciones de niveles aguas arriba o aguas abajo de los tramos, etc.

Este problema es formulado como uno de control realimentado aplicado en forma automática. En este tipo de control la operación de las compuertas se realiza a través de dispositivos mecánicos, eléctricos o electrónicos. Estos equipos monitorean los niveles de la superficie de agua y la posición de las compuertas y procesan la información a través de un algoritmo de control, mediante el cual se toman las decisiones para ejecutar determinados ajustes. El esquema de control aplicado en este caso es del tipo “control lejano aguas abajo” y se lleva a cabo en forma descentralizada. En este sentido, la acción de control es realizada sobre las compuertas de acuerdo con las mediciones obtenidas aguas abajo de la misma. La variable monitoreada en este caso, es el tirante de agua en cada salida lateral. El esquema de control puede observarse en la [Figura 1](#).

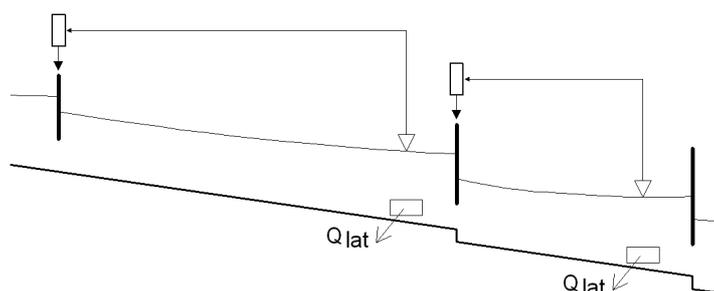


Figura 1: Esquema de control del canal.

El esquema utilizado en este caso es el control PID mediante el cual la acción de control a realizar es proporcional a la desviación de la variable controlada, la desviación acumulada y la velocidad de cambio de la variable. El algoritmo PID puede ser escrito como:

$$b(t) = k_p e(t) + k_i \frac{de(t)}{dt} + k_d \int e(t) dt \quad (6)$$

donde $b(t)$ (m) es la acción de control; $e(t)$ (m) es la desviación de la variable a controlar de su valor de referencia en el tiempo t (s) y k_p , k_i , k_d son las ganancias proporcional, integradora y derivativa respectivamente. El controlador PID generalmente se reduce a PI debido a la dificultad que existe de calibrarlo correctamente. (Astrom and Hagglund, 1995)

La desviación de la variable a controlar respecto de su valor de referencia se expresa como:

$$e(t) = y(t) - y_{ref} \quad (7)$$

donde $y(t)$ (m) es el tirante de agua medido en la progresiva de la compuerta lateral e y_{ref} (m) es el nivel de agua deseado.

La dificultad principal de este tipo de controlador reside en la obtención de las ganancias adecuadas para su correcta calibración. Por este motivo, este problema se plantea como una optimización donde las variables a determinar son las ganancias correspondientes de cada controlador de las compuertas. Para resolver esto, se plantea la función objetivo como el error cuadrático medio entre los valores de caudales laterales necesarios y los valores obtenidos con distintos valores de ganancias (Ec. 8) Luego, se aplican perturbaciones al estado que se desea mantener constante y se implementa el algoritmo de optimización para obtener las ganancias del controlador.

$$L(b_i) = \sqrt{\frac{b_i = \arg \min L(b_i)}{\sum_{k=1}^s \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^M \left(\frac{Q_s(i, j) - Q_m(i, j)}{Q_m(i, j)} \right)^2}} \quad (8)$$

s.a.M

donde Q_s (m³/s) es el caudal erogado por las compuertas laterales; Q_m (m³/s) es el caudal lateral necesario; s es la cantidad de perturbaciones simuladas; a es la cantidad de salidas laterales y M es la cantidad de mediciones temporales de los caudales laterales.

Con el objetivo de evaluar el control en el canal existen tres indicadores de desempeño que fueron propuestos por Clemmens et al., (1998): el máximo error absoluto (*MAE*), la integral del error absoluto (*IAE*) y la integral del cambio absoluto de caudal (*IAQ*):

$$MAE = \frac{\max(|y_j - y_t|)}{y_t} \quad (9)$$

$$IAE = \frac{(\Delta t/T) \sum_{j=0}^N |y_j - y_t|}{y_t} \quad (10)$$

$$IAQ = \sum_{j=j_1}^N (|Q_j - Q_{j-1}|) - |Q_0 - Q_N| \quad (11)$$

donde N es el número de intervalos de tiempo; h_j (m) es el nivel de agua en el intervalo j ; h_t (m) es el nivel de agua deseado; Δt (s) es el intervalo de tiempo de regulación que se mantiene constante durante el tiempo de prueba T (s); Q_j (m³/s) es el caudal en la compuerta en el tiempo j ; y Q_0 y Q_N (m³/s) son, respectivamente, los caudales inicial y final en la compuerta.

El indicador *MAE* cuantifica la desviación máxima entre el nivel de agua deseado y el valor real. El *IAE* indica cuán grande (y durante cuánto tiempo) el nivel de agua se aleja del nivel deseado. El *IAQ* (m³/s) se refiere a los cambios en el caudal en las compuertas. Una fluctuación repentina de caudal puede provocar oscilaciones excesivas en los niveles de agua, lo que produce una situación indeseable. El segundo término en la Ecuación (11) es la

diferencia entre los caudales iniciales y finales y permite que el valor mínimo de IAQ sea cero.

5 METODO DE SOLUCION

La solución de los problemas de optimización formulados (Ec. 4, 5 y 8) requiere la simulación de numerosos escenarios hidrodinámicos. Para ello, las ecuaciones (1), (2) y (3) se resuelven numéricamente haciendo uso del un método de diferencias finitas conocido como esquema de Preissmann (Chanson, 1995 y Ding, 1995).

La selección de los valores de diseño óptimos de los problemas enunciados se realiza a través del método de recocido simulado. Ésta es una técnica heurística de optimización combinatoria basada en la generación aleatoria de soluciones factibles cuya principal característica es evitar la convergencia local en problemas de gran escala. Este método se basa en la analogía entre el recocido de metales y la minimización. El recocido es un proceso que consiste en calentar un metal por sobre su punto de derretimiento y luego dejarlo enfriar de manera tan lenta que sus átomos altamente excitados se pueden ordenar en un estado de mínima energía provocando así un cristal con estructura regular. Análogamente, el procedimiento iterativo que se utiliza para resolver problemas de optimización se lleva a cabo como un proceso de reordenamiento microscópico donde la función objetivo ocupa el mismo lugar que la energía en el proceso de recocido.

El algoritmo para el problema de optimización comienza fijando un valor inicial aleatorio como solución posible y, a partir de éste, genera nueva soluciones Para cada iteración, el algoritmo evalúa si el valor de la función objetivo correspondiente a ese punto produce un valor menor que el anterior. El punto es aceptado como nueva solución, si minimiza la función objetivo. Si no lo hace, su aceptación queda determinada por una distribución probabilística (Cortínez et al., 2009 y Yang, 2005).

Los pasos del algoritmo del método de recocido simulado utilizado se describen a continuación. Previamente se define el valor x_0 como el vector que contiene las distintas aperturas de compuertas y $f(x)$ como los valores de la función objetivo según los casos definidos por las expresiones (4), (5) y (8).

Paso 0. Se elige un valor inicial x_0 , los límites superior e inferior del dominio, u y l , el número máximo de iteraciones k_{max} , el coeficiente de enfriamiento q y el valor de tolerancia relativa ε_f de la fluctuación de valores.

Paso 1. En el inicio, $x = x_0$, $x^0 = x$, $f^0 = f(x)$.

Paso 2. Para $k = 1$ hasta k_{max} , se genera un vector y con distribución uniforme $U[-1,+1]$, se transforma por la inversa de μ y se obtiene Δx . Luego se toma $x_1 = \Delta x + x$.

Si $\Delta f = f(x_1) - f(x) < 0$, entonces $x_1 = x$ y si $f(x) < f^0$, $f(x^0) = f^0$. Si no, se genera un número aleatorio β entre $[0,1]$ y se compara con el valor p que corresponde a la probabilidad de tomar el paso Δx . Si $\beta < p$, entonces $x_1 = x$.

La generación del paso Δx se realiza por medio de las siguientes expresiones:

$$\Delta x = g_{\mu}^{-1}(y)(u - l) \quad (12)$$

$$g_{\mu}^{-1}(y) = \frac{(1 + \mu)^{|y|} - 1}{\mu} \text{sign}(y) \quad \text{para } |y| \leq 1 \quad (13)$$

$$\mu = 10^C \left(\frac{k}{k_{max}} \right)^q \quad \text{con } q > 0 \quad (14)$$

donde C es un factor de escala de la generación del paso.

Por otro lado, la probabilidad de aceptación p responde a la siguiente ecuación:

$$p = \exp \left(- \left(\frac{k}{k_{max}} \right)^q \frac{\Delta f}{|f(x)| \varepsilon_f} \right) \quad \text{para } \Delta f > 0 \quad (15)$$

Mediante la aceptación de puntos que no minimizan la función objetivo como nuevos puntos de partida de las siguientes iteraciones, el algoritmo evita quedar atrapado en un mínimo local de la función.

6 RESULTADOS NUMÉRICOS

Se estudia el comportamiento de un canal natural de sección trapezoidal con pendiente lateral 1H:1,5V y base de fondo 7m. El canal posee una longitud total de 17km y cuatro tramos de 7, 3, 3 y 4km. La pendiente longitudinal del canal es de 0.0001 y el coeficiente de rugosidad de Manning tiene un valor de 0.0235. Las condiciones iniciales del flujo se asumen como conocidas. Los coeficientes de compuertas poseen un valor de 0,61 en el caso de las compuertas transversales y de 0,60 para las compuertas laterales. Las aperturas de las compuertas laterales y las condiciones de flujo en los canales secundarios se mantienen constantes. Las compuertas laterales están ubicadas a 5m de las compuertas transversales.

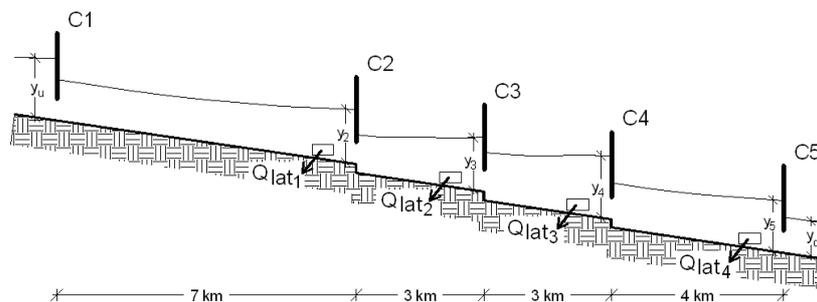


Figura 2: Perfil longitudinal del canal.

6.1 Optimización de la operación de compuertas en estado estacionario

Se presupone que en el estado inicial el canal se encuentra en un estado estacionario conocido. El estado final se plantea con el objetivo de lograr determinados aumentos de caudal en las derivaciones. Este incremento de caudal se produce realizando movimientos en las compuertas 1 a 4 mientras que la compuerta 5 se mantiene constante con una apertura de 1m. Los valores de los caudales laterales y las aperturas de compuertas obtenidas se muestran en las Tablas 1 y 2 respectivamente.

	Q lateral 1	Q lateral 2	Q lateral 3	Q lateral 4
Estado inicial	1,00	1,00	1,00	1,00
Estado final	2,00	1,75	1,50	1,25

Tabla 1: Caudales (m^3/s) laterales en los estados estacionarios.

	C1	C2	C3	C4
Estado final	0,965	0,900	0,920	1,015

Tabla 2: Aperturas (m) de compuertas obtenidas mediante la optimización.

6.2 Optimización de la operación de compuertas en estado transitorio

a) Movimiento simultáneo de compuertas

Se analizó la sucesión de movimientos de compuertas necesaria para minimizar la fluctuación de los flujos laterales entregados durante la modificación de sus valores para cumplir con cierta demanda. Para este estudio se dividió la duración total de la operación de las compuertas en intervalos constantes durante los cuales se mantendrán fijas las aperturas. Estas posiciones de las compuertas se determinaron mediante el problema de optimización comentado anteriormente con el objetivo de cumplir lo antes posible con la demanda de caudales laterales evitando provocar grandes fluctuaciones del nivel de agua del canal.

En este caso se realizó el estudio de una operación de 8 horas de duración, con movimientos llevados a cabo cada 1 hora, realizados simultáneamente en las compuertas C1 a C4. En la [Tabla 3](#) se muestra la sucesión de aperturas de compuertas obtenidas.

Tiempo (hs)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
C1	2,400	2,400	2,400	2,400	1,650	0,890	0,445	1,325	0,965
C2	1,100	2,400	2,400	1,375	1,005	0,875	0,920	0,855	0,900
C3	0,210	1,015	1,790	1,290	0,815	1,060	0,855	0,925	0,920
C4	0,100	0,100	1,180	1,280	0,910	1,135	0,875	1,060	1,015

Tabla 3: Sucesión de aperturas de compuertas (m).

En la [Figura 3](#) se pueden observar los caudales laterales en las salidas 1 y 2 correspondientes a dos casos de movimientos de compuertas. El caso (a) corresponde al movimiento instantáneo de cada compuerta en la posición final, mientras que el caso (b) representa los caudales laterales erogados mediante las sucesiones de movimientos de compuertas obtenidos en la optimización.

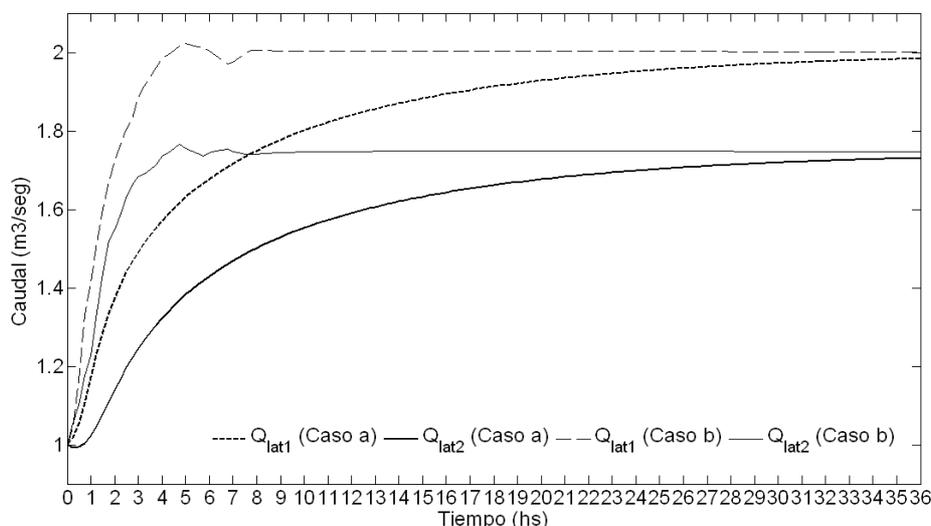


Figura 3: Caudales laterales 1 y 2 derivados según dos modos de movimientos de compuertas.

A través de las sucesiones de movimientos de compuertas se mejora la entrega del caudal demandado. En el caso (a) se logra reducir el error en el caudal entregado a un 5% luego de 18hs del cambio de posición de las compuertas, mientras que en el caso (b) este error se consigue reducir al 5% a 3,5hs de comenzada la operación de las compuertas.

b) Movimiento sucesivo de compuertas

Con el mismo objetivo de incrementar la entrega de caudales laterales se establece una serie de movimientos aplicados en forma sucesiva en las distintas compuertas del canal a medida que un operario recorre el mismo. De esta forma, los movimientos no se realizan simultáneamente y los intervalos de tiempo en que se ejecutan las modificaciones de aperturas no son iguales para todas las compuertas.

En este caso, la duración total de operación de compuertas es de 12 horas y el primer movimiento se realiza en la compuerta C1. Una vez efectuado este primer movimiento, se lleva a cabo el segundo sobre la compuerta C2 luego de 1 hora. El tercer movimiento se realiza sobre la compuerta C3 y el cuarto en la C4 a intervalos constantes. Una vez que se realiza el movimiento en la compuerta del extremo, se recorre el canal en sentido opuesto. El esquema de movimientos y las aperturas de compuertas obtenidas se pueden ver en la [Tabla 4](#). Los valores marcados con asterisco corresponden a las posiciones finales de las compuertas determinadas mediante la optimización en estado estacionario.

En la [Figura 4](#) se pueden observar los caudales laterales 1 y 2 correspondientes a dos series de movimientos de compuertas. El caudal graficado como caso (a) corresponde al movimiento de cada compuerta en la posición final en el instante correspondiente según la secuencia de aperturas, mientras que el caso (b) representa los caudales laterales erogados mediante el movimiento de compuertas obtenido mediante la optimización.

Tiempo (hs)	C1	C2	C3	C4
0	2,400	-	-	-
1	-	2,250	-	-
2	-	-	1,450	-
3	-	-	-	1,295
4	-	-	0,905	-
5	-	0,460	-	-
6	0,675	-	-	-
7	-	0,875	-	-
8	-	-	0,885	-
9	-	-	-	1,015*
10	-	-	0,920*	-
11	-	0,900*	-	-
12	0,965*	-	-	-

Tabla 4: Esquema de movimientos y posiciones de las compuertas (m).

En el caso (b) se logra el 95% de los cuatro caudales laterales demandados a partir de las 8 horas de comenzada la operación de compuertas, mientras que en el caso (a) este porcentaje de caudal recién se consigue a las 18 horas aproximadamente.

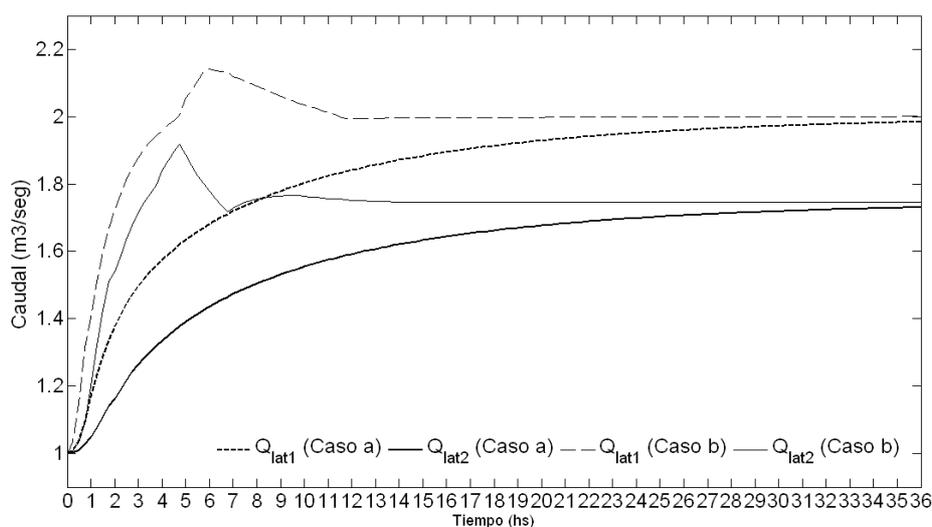


Figura 4: Caudales laterales 1 y 2 derivados según dos modos de movimientos de compuertas.

6.3 Control de niveles de agua

Una vez logrado el estado estacionario deseado es necesario mantener los valores de niveles de agua en el canal para impedir fluctuaciones en las entregas del caudal demandado. Para llevar a cabo esta tarea de control de niveles se estudió la implementación de un controlador del tipo PI. Este controlador establece una acción de control a partir de la medición de la variable a regular. En este caso, el nivel de agua que es necesario mantener constante corresponde al nivel de tirante en las salidas laterales, mientras que la acción de control se lleva a cabo en las compuertas ubicadas aguas arriba de las derivaciones laterales.

Los controladores PI deben ser calibrados para que funcionen correctamente. Esta calibración se lleva a cabo mediante una optimización donde las variables a determinar son las ganancias de cada controlador. Para llevar a cabo esta calibración se simulan varias situaciones de perturbación del estado de referencia que se desea mantener constante.

Las perturbaciones aplicadas en este caso consistieron en: 1) apertura de una compuerta lateral adicional, 2) movimiento brusco escalonado de la compuerta C5 y 3) variación escalonada del tirante aguas arriba de la compuerta C1.

Las ganancias obtenidas mediante el método de optimización se resumen en la [Tabla 5](#).

Compuerta	C1	C2	C3	C4
$k_p(-)$	- 4,21	- 5,89	- 5,50	- 4,51
$k_i(s^{-1})$	- 0,94	- 1,84	- 2,16	- 0,94

Tabla 5: Ganancias obtenidas para el controlador PI.

En la [Figura 5](#) se puede observar el caudal lateral en la salida 4 durante la simulación de una perturbación en el canal. Esta perturbación consiste en el cierre y apertura de la compuerta final C5 un [-25%, 15%, -25%, 15%] con respecto al nivel de referencia de 1 m en intervalos de [2, 1, 0,5 y 0,5] horas, respectivamente.

El caso (a) corresponde al caudal lateral derivado cuando no se ejerce ninguna acción de control sobre las compuertas para atenuar la perturbación. El caso (b) muestra el caudal lateral erogado cuando se lleva a cabo la regulación de los niveles de agua mediante controladores PI cuyas ganancias fueron calibradas mediante la optimización. Finalmente, el caso (c) muestra el caudal lateral producido mediante la regulación del canal con controladores PI no

calibrados. Los valores de ganancias utilizados fueron: $k_p = k_i = [-0,1 \ -4,0 \ -4,0 \ -0,1]$

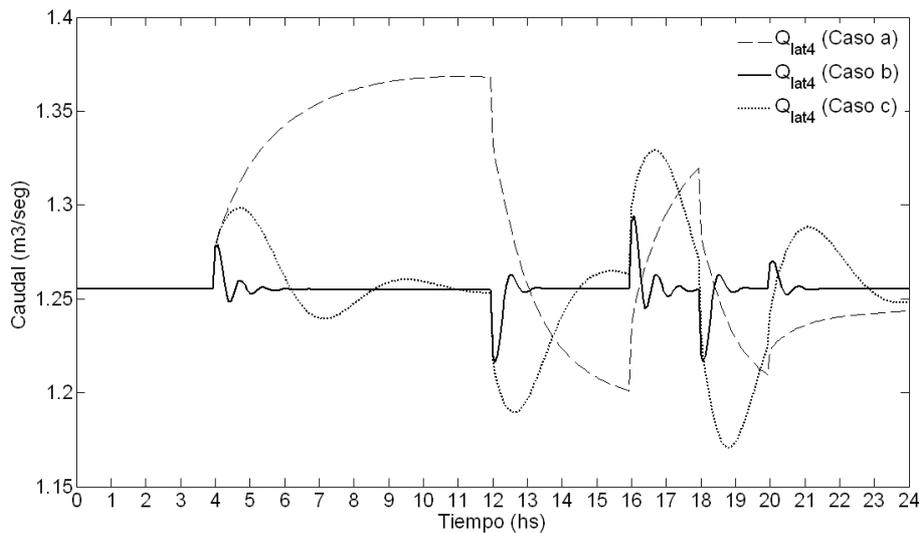


Figura 5: Caudal lateral 4 erogado durante la perturbación 2 en bajo tres casos de control.

Los valores de los indicadores *MAE* (Ec. 9), *IAE* (Ec. 10), *IAQ* (Ec. 11), para los tres casos graficados en la Figura 5 se pueden observar en la Tabla 6. Se indican los valores máximos y el promedio de los cuatro controladores del canal. En la Tabla 7 se muestran los valores de exceso y déficit de volúmenes de agua en cada salida lateral y para cada caso de control analizado durante el tiempo total de la simulación de la perturbación (24 horas).

	MAE (%)		IAE		IAQ (m ³ /s)	
	Max.	Prom.	Max.	Prom.	Max.	Prom.
Caso a	17,99	7,90	7,17	3,50	0,53	0,19
Caso b	6,02	4,02	0,34	0,19	0,43	0,36
Caso c	12,40	4,48	3,19	1,18	0,64	0,25

Tabla 6: Indicadores de desempeño de los controladores PI.

	Exceso (m ³)				Déficit (m ³)			
	Qlat ₁	Qlat ₂	Qlat ₃	Qlat ₄	Qlat ₁	Qlat ₂	Qlat ₃	Qlat ₄
Caso a	0	0	640,4	3167,1	2739,8	1415,3	663,9	801,0
Caso b	53,4	48,0	53,0	96,5	58,2	49,2	52,1	103,5
Caso c	580,4	11,6	16,1	895,4	707,6	12,9	14,7	924,8

Tabla 7: Exceso y déficit en la entrega de caudal lateral durante la perturbación.

7 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propuso técnica para controlar los niveles de agua en un canal de riego. Se planteó una metodología para diseñar estrategias de manejo de compuertas con el fin de cumplir con algunos objetivos. Por un lado se estudió la necesidad de establecer la configuración de aperturas de compuertas transversales necesaria para llevar a cabo la derivación de determinados caudales laterales demandados. Estos caudales dependen de la altura del tirante de agua en la ubicación de la salida lateral. Una vez obtenida esta disposición se analizó la sucesión de movimientos de compuertas necesario para conducir al canal de un estado estacionario conocido al estado estacionario deseado. Por otro lado, propuso la

implementación de un controlador automático PI para mantener el canal en un estado estacionario ante la acción de perturbaciones imprevistas como apertura de compuertas laterales adicionales o cambios bruscos en los extremos del canal.

Estos problemas de optimización se resolvieron utilizando una combinación de un método de optimización global denominado “Método de Recocido Simulado” y una solución aproximada de las ecuaciones que describen la dinámica de canales.

Se muestra que es posible diseñar estrategias eficientes de manejo de compuertas con el objetivo de satisfacer determinados protocolos de entregas de caudales en canales laterales. Estas estrategias de control pueden adaptarse a las distintas posibilidades de manejo de compuertas disponibles. Por otro parte, se muestra la adecuada implementación de un controlador automático del tipo PI para minimizar las fluctuaciones inesperadas del nivel de agua en el canal.

Asimismo, se podrían analizar el diseño de maniobras llevadas a cabo manualmente con el objetivo de minimizar las fluctuaciones de niveles por perturbaciones imprevistas.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se ha realizado en el marco del proyecto “Modelos Matemáticos en Ingeniería Ambiental: Problemas Directos e Inversos” CIMTA, Universidad Tecnológica Nacional). Asimismo forma parte del trabajo de tesis desarrollado por J.V. Martorana, bajo la dirección del Dr. V.H. Cortínez, para obtener el título de Mg. en Ingeniería en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur.

REFERENCIAS

- Astrom, K. J., and Hagglund, T., PID controllers: theory, design, and tuning. *Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina*, 2nd ed., 1995.
- Baume, J.P., Malaterre, P.O., and Sau, J., Tuning of PI controllers for an irrigation canal using optimization tools. *Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems, Phoenix, Arizona*, 483-500, 1999.
- Chanson H., Environmental Hydraulics of Open Channel Flows, *Elsevier Butterworth-Heinemann*, 2004.
- Clemmens, A.J., Kacerek, T.F., Grawitz, B. and Schuurmans W., Test cases for canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.124, No.1, 1998.
- Cortínez, V. H., Sequeira, M.E. y Vidal, M. C., Identificación de fuentes de ruido en ambientes urbanos industriales, *Contaminación Atmosférica en Argentina (Eds. E. Puliafito y N. Quaranta)*, Universidad Tecnológica Nacional, 2009.
- Ding Y., Wang S.S.Y., Optimal control of open-channel flow using adjoint sensitivity analysis, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, p. 11, 2006.
- Lozano, D., Arranja, C., Rijo, M. and Mateos, L., Simulation of automatic control of an irrigation canal. *Agricultural Water Management*, 97:91-100, 2010.
- Martorana, J.V., Cortínez, V.H., Control óptimo en canales de riego mediante una técnica estocástica de optimización global, *Contaminación atmosférica e hídrica en Argentina. Ed. Dr. Ing. Enrique Puliafito, Universidad Tecnológica Nacional*, 2011
- Yang W.Y., Applied numerical Methods using MATLAB, *Wiley - Interscience*, 2005.