

UNA HERRAMIENTA DE CONTROL DE TRANSITORIOS EN CANALES DE REGADÍO

Joan Soler Guitart⁽¹⁾, Manuel Gómez Valentín⁽²⁾ y José Rodellar Benedé⁽³⁾

Resumen:

El problema de ajustar los caudales suministrados por un canal en lámina libre a los caudales demandados por los regantes en determinados puntos de derivación del canal requiere cierta capacidad de maniobra del canal y también necesita del estudio de transitorios. Se presenta un algoritmo de control en lazo abierto del flujo en lámina libre en canales basado en técnicas computacionales de optimización de problemas en régimen no estacionario que permite, conocidas las demandas de riego en un periodo de tiempo dado, definir los movimientos de todas las compuertas del canal para cumplir con el caudal deseado y en el instante requerido, optimizando así el aprovechamiento de los volúmenes de agua. Finalmente, se ilustra su utilización resolviendo dos problemas clásicos en el control de canales.

Palabras clave: control predictivo no lineal, optimización, canales de riego, recursos hídricos, previsión de transitorios.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, y de forma creciente, aumenta el déficit de agua potable en España y por tanto aparecen nuevas y serias dificultades para el desarrollo agrícola e industrial. El agua es un recurso natural escaso sin sustituto posible y es contaminada por la propia acción del hombre. Aunque se trata de un recurso renovable, existe en cantidades limitadas y con variaciones muy pronunciadas tanto en el espacio como en el tiempo. Por estos motivos, y debido a la competencia entre los diferentes usuarios, la gestión del agua siempre ha sido fuente de conflicto y es, en consecuencia, cada vez más exigente y delicada. De esta forma, cualquier trabajo que vaya encaminado a intentar lograr una mejor utilización racional del agua y a aumentar de la eficiencia de su uso es bienvenido y de gran actualidad científica, técnica, económica, ecológica y social.

En España, la agricultura es el gran consumidor de agua dulce ya que gasta un 80% (Ministerio de Industria y Medio Ambiente, 1998) de todos los recursos generados. Por lo tanto, cualquier mejora en la eficiencia de uso en este sector tiene una inmediata repercusión en el ahorro general. En muchos lugares del país se buscan nuevas fuentes del recurso en lugar de mejorar la eficiencia de uso. Por ejemplo, en lugar de sustituir los sistemas de riego obsoletos, se aumentan las extracciones de agua subterránea. Desde el punto de vista ecológico, resulta de lo más incongruente ya que esta fuente de agua sólo es renovable en la mayoría de casos al cabo de muchos años. Para aumentar el rendimiento en este sector y permitir el desarrollo sostenible de las cuencas, se tienen que llevar a cabo esfuerzos dirigidos a aplicar métodos modernos en la administración y gestión de los sistemas de transporte, reparto, riego y drenaje.

¹ Profesor. E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Dpto. de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental. Universidad Politécnica de Catalunya. ² Catedrático de universidad. E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Dpto. de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental. Universidad Politécnica de Catalunya. ³ Catedrático de universidad. E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Dpto. de Matemática Aplicada III. Universidad Politécnica de Catalunya.

Artículo recibido el 15 de febrero de 2004, recibido en forma revisada el 16 de junio de 2004 y aceptado para su publicación el 24 de junio de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Según un estudio, citado en Liria (2001), de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes (ICID), el transporte, el riego y el consumo de agua por parte de las plantas se reparten el agua dulce consumida a partes iguales:

- 1/3 es perdida en el transporte y distribución;
- 1/3 es perdida durante la aplicación sobre la parcela y
- 1/3 es consumida, evapotranspirada por las plantas.

La tercera parte perdida en la distribución y el transporte se produce mediante los siguientes mecanismos:

- Infiltración
- Evaporación
- Operaciones de control y regulación

Goussard (1993) asegura que se puede llegar a ahorrar hasta un 10% del agua gestionada, simplemente mejorando las operaciones de control y regulación hechas durante el transporte y la distribución de agua a través de las redes de canales. El presente trabajo versa sobre una manera de ayudar a reducir esta cantidad de agua.

Clark (1972) y Clemens y Replogle (1989) aseguran que la experiencia mundial nos dice que una vía importante para resolver esta problemática es la introducción de algún grado de automatización de la red de distribución de agua de los sistemas de riego, la cual garantiza un aumento de eficiencia de la distribución del agua, un ahorro de energía eléctrica, una disminución considerable de las pérdidas improductivas de agua al conseguir una estricta correspondencia entre las demandas y los suministros de agua y un aumento de la efectividad en la explotación de los canales de riego y en la producción de alimentos.

Goussard (1993) asegura que, idealmente, un sistema de irrigación podría asegurar el envío de agua a los hidrantes de los agricultores de acuerdo con los requerimientos actuales de los cultivos, tanto desde el punto de vista de la puntualidad como de la cantidad (éste es el deseo de la agricultura moderna ya que con él se consiguen los mejores rendimientos). En la práctica, el anterior objetivo rara vez se consigue a causa de las siguientes razones:

1. En el mejor de los casos, los requerimientos de agua de los cultivos son meras aproximaciones

que se basan tanto en estimaciones de los agricultores de sus necesidades, posiblemente sobreestimadas por el miedo a quedarse cortos, como en estimaciones de los responsables de la gestión, que se basan en registros climatológicos, en previsiones meteorológicas futuras, en datos obtenidos de los propios cultivos y en modelos de crecimiento y consumo de agua. La existencia de la discrepancia entre la demanda anticipada por los modelos de crecimiento y la actual dependerá de factores como la duración del periodo de la previsión (u horizonte de predicción), la frecuencia de actualización de los datos, la variabilidad de las condiciones climatológicas en tiempo y espacio y la diversidad de cultivos; y

2. Para poder suministrar las necesidades calculadas de todos los cultivos hace falta reunir todas las demandas en los puntos del canal principal donde se hace la extracción de agua y, posteriormente, hace falta que la demanda agregada resultante en estos puntos sea transportada a través del sistema de manera que se disponga de ella en el momento preciso y en la cantidad requerida. Al mismo tiempo, hay que asegurar que las posibilidades físicas del canal no sean superadas, restringiendo los niveles de agua dentro de un intervalo de operación para evitar desbordamientos y para controlar las salidas laterales de caudal en los citados puntos de extracción. El problema de ajustar el transporte y el envío de agua a la demanda en muchos sistemas de abastecimiento de agua es especialmente complejo en el caso de una red de canales donde el flujo de agua en lámina libre raramente es estacionario y donde las distancias de transporte y los tiempos de envío son muy grandes.

OBJETIVO DEL TRABAJO

En el presente trabajo, se entiende por modernización de los proyectos de regadío a la mejora general de las redes de transporte y distribución de agua y de las técnicas de aplicación del agua en parcela con el objetivo de aumentar la eficiencia de uso de agua, la cual resulta ser extremadamente baja. La mejora global de la eficiencia se puede dar a tres niveles: a nivel de transporte a través del canal principal; a nivel de distribución a través de la red secundaria y a nivel de aplicación de agua en parcela.

La mejora de utilización del agua en estos tres niveles tiene que ser, a nuestro entender, tanto individual, para cada una de éstas, como conjunta. Esencialmente, la mejora de cualquier técnica de aplicación en parcela pasa por un aumento de la flexibilidad de llegada de agua a pie de parcela a través de la red de distribución; y para lograr flexibilidad en la red secundaria, hace falta considerar el flujo en el canal principal de transporte variable en el tiempo, es decir, no estacionario. Resulta claro que la única forma de conseguir controlar un flujo transitorio es mediante automatismos y que éstos estén gobernados por algoritmos adecuados.

Siguiendo la teoría del control predictivo (Martín-Sánchez y Rodellar, 1996), las diferentes etapas de cálculo que deben incluirse en el proceso completo de control de un canal de regadío son, a nuestro modo de ver, las siguientes (Figura 1):

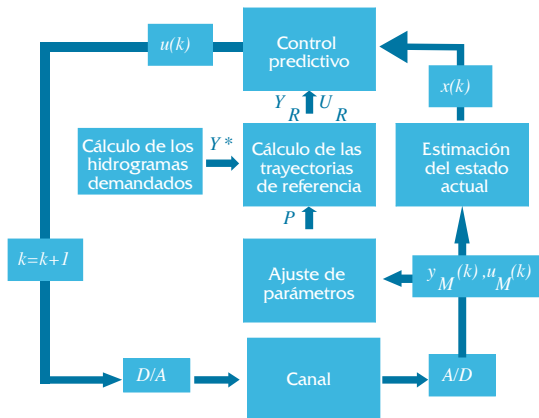


Figura 1: Esquema del proceso global de control en canales de regadío.

1. A partir de las necesidades de agua se calculan los hidrogramas integrados en los puntos de derivación lateral del canal principal. El comportamiento del canal que suministra dichos hidrogramas conforma el “comportamiento deseado” — Y^* —.
2. Este comportamiento debe ser transmitido al algoritmo de “Cálculo de las Trayectorias de Referencia” a seguir por el movimiento de cada compuerta. Dicho algoritmo calcula el comportamiento óptimo — Y_R —, que es el más parecido al deseado pero que es posible físicamente. Tanto las trayectorias óptimas del comportamiento del canal — Y_R — como las de las estructuras de control — U_R — que denominamos como trayectorias de referencia. Su cálculo debe ser “Off-line” (con un ciclo de riego de anticipación, por ejemplo).

3. Estas trayectorias de referencia se transmiten al siguiente algoritmo llamado de “Control Predictivo”, el cual conducirá el canal según las trayectorias de referencia. Su actuación debe ser por tanto en tiempo real (“On-line”) por lo que va recalculando las posiciones de compuerta — $u(k)$ — en cada instante de muestreo (5 minutos por ejemplo).
4. Mediante transformaciones analógico-digitales —D/A y A/D— se aplican las acciones de control sobre el canal y se obtienen medidas promedio para cada periodo de muestreo — $y_M(k)$ y $u_M(k)$ —. Las medidas se transmiten al algoritmo de “Cálculo del Estado Actual”.
5. Con dichas medidas —hechas en determinados puntos solamente— se obtiene una estimación del estado hidrodinámico actual del canal para todos los puntos — $x(k)$ —. El cálculo debería ser en tiempo real (“On-line”).
6. Dicha estimación del estado hidrodinámico debe pasarse al algoritmo de “Control predictivo” para que éste repositone las compuertas para reconducir —caso de ser necesario— el comportamiento real observado y estimado $x(k)$ del canal hacia las trayectorias de referencia.
7. Las medidas también deben ser transmitidas al algoritmo de estimación de parámetros físicos —denotados por P como por ejemplo, el coeficiente de rugosidad de canal, etc.— (los que alimentan el modelo de previsión), que actúa “Off-line” y que los actualiza en cada ciclo de riego.

A pesar de la diferente naturaleza de todos estos bloques de cálculo, todos ellos tienen una estructura matemática común: **conforman un problema de optimización no lineal con restricciones**, al que llamamos “Problema Unificado”. En este trabajo se presenta someramente el algoritmo “GoRoSo” —Gómez, Rodellar y Soler— que realiza el “Cálculo de las Trayectorias de Referencia”. También se presentan las soluciones de regulación a dos problemas clásicos de control de canales obtenidas con el algoritmo “GoRoSo”.

CÁLCULO DE LAS TRAYECTORIAS DE REFERENCIA

La estrategia de control

A partir del conocimiento de las necesidades de agua de los cultivos en un horizonte futuro de predicción se obtienen los hidrogramas correspondientes a suministrar en los puntos de derivación lateral del canal. El comportamiento del canal que es capaz de suministrar dichos hidrogramas lo llamamos *comportamiento deseado*. Pero existen algunos problemas en la distribución de agua para la consecución de este comportamiento que son debidos a:

- El retraso en la transmisión de agua a grandes distancias y a
- La inexactitud en el ajuste de las estructuras de control.

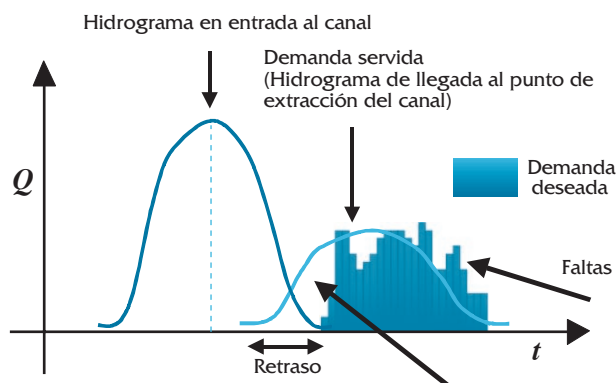


Figura 2: Desajuste de caudales servidos y consumidos

Así, en este trabajo, el problema de control queda definido como “encontrar la forma de mover las compuertas para ajustar el caudal suministrado al demandado”. Si se dispusiera de un canal de pruebas y suficiente tiempo para realizar ensayos, se podría encontrar la manera de mover las compuertas para lograr el objetivo de ajustar el comportamiento del canal al *comportamiento deseado*, obteniéndose el *comportamiento óptimo*, que es el más parecido al deseado pero que es físicamente posible.

En los casos como éste, en que se tienen que hacer pruebas de ensayo y error, resulta del todo imprescindible la utilización de modelos matemáticos, que sustituyan estos costosos ensayos de campo por otros numéricos mucho más baratos. Así, en lugar de ensayar con el canal real y con agua real, se utiliza el modelo matemático. Y cuando, también, matemáticamente, se decide modificar las trayectorias de la compuertas, se tiene un algoritmo.

“GoRoSo” es una herramienta de programación matemática mediante la cual se va obteniendo una sucesión de trayectorias de compuerta U_R^{iter} que ensayadas en el modelo matemático dan lugar a otra serie, esta vez de *comportamientos predichos* $Y_R^{iter}(U_R^{iter})$, que tienden cada vez más hacia el *comportamiento deseado* Y^* , llegando al final de la sucesión a la *trayectoria de referencia de compuertas* U_R que es la que más hace asemejar el comportamiento predicho $Y_R(U_R)$ al *comportamiento deseado* Y^* . Es decir, el algoritmo hace cuadrar lo máximo posible la demanda servida —o prevista por el modelo— a la consumida —o pre-programada con anticipación— (Figura 2). Como algoritmo que es, “GoRoSo” tiene una estructura recursiva, es decir, aprovecha los resultados obtenidos por el modelo de previsión para reajustar en cada iteración las trayectorias ensayadas:

1. Inicio: $iter=0$ y $U_R^{iter} = U_0$.
2. Cálculo de la Previsión: $Y_R^{iter} = Y(U_R^{iter})$.
3. Comparativa: $Y_R^{iter} - Y^*$.
4. Si $Y_R^{iter} \cong Y^* \rightsquigarrow$ acaba;
5. Si no, actualiza:

$$U_R^{iter} = U_R^{iter} + \Delta U_R^{iter};$$

$$iter = iter + 1$$

- Vuelve al paso 2.

Aquí ΔU_R^{iter} representa la rectificación sobre las trayectorias de compuerta hecha en cada iteración del algoritmo en función de los resultados obtenidos de la previsión.

Dicho de otra forma, partiendo de una primera aproximación de la acción de control a implementar sobre el sistema, el algoritmo evalúa mediante el modelo de previsión el grado de consecución de un objetivo propuesto —en este caso el grado de similitud entre comportamientos— y calcula las rectificaciones que se introducen en la acción inicialmente propuesta de manera que la acción modificada mejore el objetivo mencionado. Y así, de forma recursiva, hasta llegar a una acción de control óptima.

Una vez encontradas la *trayectorias de referencia*, ya se puede iniciar el ciclo de riego moviendo las compuertas según estas trayectorias de compuerta de referencia calculadas, con la esperanza que el canal responda con este *comportamiento óptimo* también calculado.

El modelo predictivo

El modelo predictivo utilizado en cualquier estrategia de control predictivo es una elección muy importante. Si se entiende por modelo aquella herramienta matemática que es capaz de reproducir el comportamiento del flujo en un canal, entonces cuanto mejor sea el modelo menor será el trabajo que tendrá que desarrollar el algoritmo de control predictivo para reconducir el canal hacia las trayectorias de referencia. Dicho de otro modo, si el modelo fuera perfecto, al implementar sobre el canal las trayectorias de compuerta de referencia calculadas con GoRoSo, el comportamiento obtenido del canal sería exactamente igual a las trayectorias de los comportamientos de referencia predichos por el modelo. En este trabajo se ha utilizado el modelo completo de Saint-Venant para predecir el flujo en canales en lámina libre, que es considerado como el mejor modelo conocido hasta el momento.

El flujo de agua en lámina libre a lo largo de un canal prismático viene descrito por el sistema de ecuaciones llamadas de Saint-Venant. Este sistema en derivadas parciales es de tipo hiperbólico, quasi-lineal y de segundo orden. Las dos ecuaciones que lo constituyen están basadas en los principios físicos de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento.

Como todo sistema hiperbólico es susceptible de ser transformado en su forma característica. Tal transformación de las ecuaciones de Saint-Venant da el siguiente sistema ordinario de cuatro ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{dv}{dt} + \frac{g}{c(y)} \frac{dy}{dt} = g[S_0 - S_f(y, v)] \\ & \text{a lo largo de las curvas } C^+ \text{ (Figura 3): } \frac{dx}{dt} = v + c(y) \\ & \frac{dv}{dt} - \frac{g}{c(y)} \frac{dy}{dt} = g[S_0 - S_f(y, v)] \\ & \text{a lo largo de las curvas } C^- \text{ (Figura 3): } \frac{dx}{dt} = v - c(y) \end{aligned} \right\} (1)$$

donde y es el nivel de la superficie libre respecto del fondo del canal, v es la velocidad media ponderada de todas las partículas de una sección transversal de flujo y por tanto puede ser considerada como la velocidad instantánea de una sección material, x es el espacio, t es el tiempo, S_0 es la pendiente de la solera, $S_f(y, v)$ es la pendiente de rozamiento y finalmente c es la celeridad de una onda viajando sobre el medio respecto del propio

medio y vale $c(y) = \sqrt{gA(y)/T(y)}$ donde $A(y)$ es el área de la superficie mojada o de una sección transversal del flujo y $T(y)$ es el ancho superior de la superficie libre.

Como puede verse en la Figura 3, en cada punto del espacio x/t se cruza una curva característica (llamada positiva y denotada por C^+) con otra (llamada negativa y denotada por C^-) donde se resuelve el sistema (1).

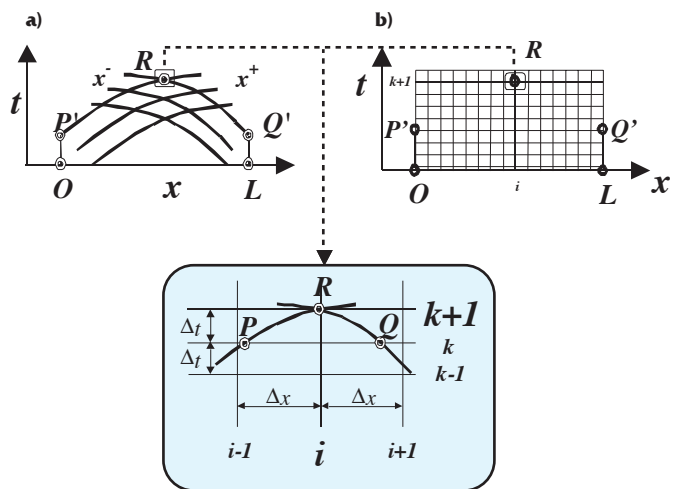


Figura 3: Esquema de las características y discretización

En este ejemplo gráfico, las curvas de tipo C^- tienen una pendiente negativa, cosa que indica que $v - c(y) < 0$. Es decir, representan condiciones de régimen subcrítico, el tipo de flujo habitual en los canales de regadío. Finalmente, a causa de la existencia de los teoremas de unicidad para sistemas hiperbólicos (ver por ejemplo, Krandall (1956)), hace falta establecer en este caso dos condiciones de contorno sobre las líneas $O-P'$ y $L-Q'$ y una condición inicial definida sobre el segmento $O-L$ (Figura 3).

Como el sistema (1) no tiene solución analítica, se tiene que resolver mediante métodos numéricos; por lo tanto, se tiene que establecer la correspondiente discretización del dominio de integración $O-L-Q'-R'-P'-O$ de la Figura 3 y de las ecuaciones, por ejemplo, mediante un esquema en diferencias finitas centrales de segundo orden llamado de características curvas en Gómez (1998): (ver ecuación 2)

donde los subíndices P y Q indican valores interpolados sobre la solución anterior al instante k , el subíndice R indica el valor obtenido para $k+1$ y donde las incógnitas son $y_R = y_i^{k+1}$, $v_R = v_i^{k+1}$, x_P y x_Q .

$$\left. \begin{aligned}
 (v_R - v_r) + \frac{g}{2} \left[\frac{1}{c(y_R)} + \frac{1}{c(y_r)} \right] (y_R - y_r) &= g \left\{ S_0 - \frac{1}{2} [S_f(y_R, v_R) + S_f(y_r, v_r)] \right\} (t_R - t_r) \\
 x_R - x_r &= \frac{1}{2} \left\{ [v_R + c(y_R)] + [v_r + c(y_r)] \right\} (t_R - t_r) \\
 (v_R - v_Q) - \frac{g}{2} \left[\frac{1}{c(y_R)} + \frac{1}{c(y_Q)} \right] (y_R - y_Q) &= g \left\{ S_0 - \frac{1}{2} [S_f(y_R, v_R) + S_f(y_Q, v_Q)] \right\} (t_R - t_Q) \\
 x_R - x_Q &= \frac{1}{2} \left\{ [v_R - c(y_R)] + [v_Q - c(y_Q)] \right\} (t_R - t_Q)
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Ecuaciones de una almenara

En este trabajo, se entiende por almenara un lugar del canal donde existe algún tipo de estructura de control. Para simplificar el problema, se ha considerado como almenara una superestructura consistente en un ensanchamiento del canal donde concurren un vertedero, una extracción por bombeo y una compuerta de guillotina. Así que, imaginemos que en el punto *i* de la Figura 3 hay una almenara como la de la figura 4. Entonces, en este punto, se tienen que verificar las dos ecuaciones siguientes:

$$A[y_e(k)]v_e(k) = q_b + q_s + A[y_s(k)]v_s(k) \quad (3A)$$

$$A[y_s(k)]v_s(k) = C_d a_c u_j(K) \sqrt{2g[y_s(k) + d - y_e(k)]} \quad (3B)$$

donde C_d es el coeficiente de desague de la compuerta, a_c es el ancho de la compuerta y $u_j(K)$ es la abertura de la compuerta en el instante k de simulación, es decir, del periodo K , q_b es el caudal de extracción por bombeo programado para el instante k y q_s es el caudal de salida lateral a través del vertedero controlado por el nivel de la almenara y que vale:

$$q_s = C_s l_s \sqrt{2g} [y_e(k) - y_0]^{\frac{3}{2}}$$

donde C_s es el coeficiente de desague del vertedero, l_s es su longitud e y_0 es la altura de su labio.

Estas ecuaciones de tipo algebraico establecen las relaciones existentes entre los estados hidrodinámicos justo aguas arriba y aguas abajo de las compuertas. Puesto que este sistema está constituido por dos ecuaciones —3(a) y 3(b)— y cuatro incógnitas — $y_e(k)$, $v_e(k)$, $y_s(k)$ y $v_s(k)$ — tiene múltiples soluciones. Para resolver esta situación, si se supone que en el punto *i* de la Figura 3 hay una compuerta, en el punto *R* convergen dos curvas características y por tanto se tienen que verificar las cuatro ecuaciones del sistema (2) más las dos relaciones de (3).

Por lo tanto, se tienen seis ecuaciones con las seis incógnitas x_p , y_{Re} , v_{Re} , y_{Rs} , v_{Rs} y x_Q . Hay que hacer notar que los nodos *Rs* y *Re* están sobre el mismo punto de la malla y por tanto, se considera una almenara como un nodo con cuatro incógnitas y_{Re} , v_{Re} , y_{Rs} y v_{Rs} .

Esquema de una almenara

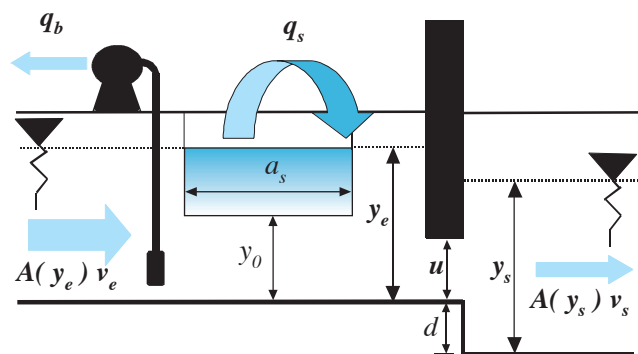


Figura 4: Esquema de una almenara con una compuerta, un bombeo y un vertedero.

Las trayectorias de compuerta

Las estructuras de control más frecuentes en canales son las compuertas y por este motivo las vamos a dejar como las únicas representantes de las estructuras de control para el resto del trabajo. Hay muchas maneras de modelar una trayectoria de compuerta o lo que es lo mismo la evolución temporal de su abertura. La función más parecida al funcionamiento real y, además, la más sencilla de expresar matemáticamente, es la que supone una abertura constante entre dos instantes consecutivos de tiempo, es decir, se trata de una función establecida por tramos como se puede ver en la Figura 5.

En consecuencia, se define un parámetro genérico de compuerta — $u_j(K)$ — como la abertura entre los instantes t^{K-1} y t^K —esto es $u_j(K) = u_j[t^{K-1}, t^K]$ —.

De esta manera, se puede compilar todos los parámetros en un vector solo que, teniendo en cuenta las nc trayectorias de las respectivas compuertas, puede expresarse de la siguiente forma:

$$U = [u_1(K_1), \dots, u_j(K_1), \dots, u_{nc}(K_1), \dots, \dots, u_{nc}(K), \dots, u_1(K_F), \dots, u_j(K_F), \dots, u_{nc}(K_F)] \quad (3)$$

donde K representa el índice temporal de tramo de trayectoria que empieza en K_1 , el primer periodo del horizonte de predicción, y termina en K_F de manera que $K_F - K_1 + 1$ es el número total de intervalos de muestreo en que se han subdividido el horizonte de predicción y que equivale al número de tramos de las trayectorias de compuerta. Como ya se ha dicho anteriormente, este vector U será la incógnita.

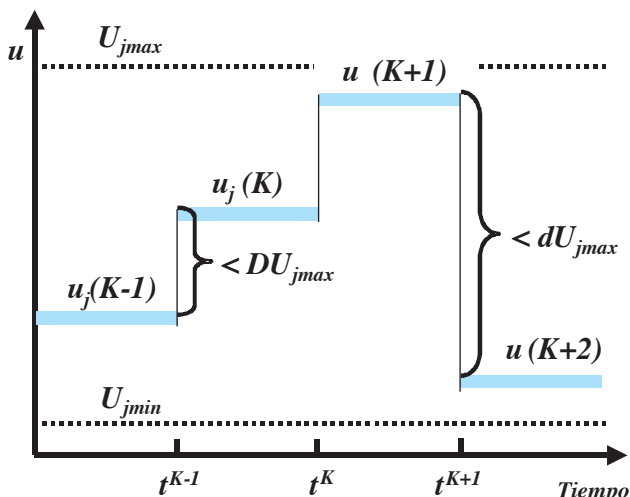


Figura 5: Representación de una trayectoria de compuerta.

El vector previsión

El vector previsión es un vector que contiene los valores de niveles y velocidades que se producen a lo largo del horizonte de previsión en determinados puntos o secciones del canal puesto que se utilizan métodos numéricos para obtenerlos. En la figura 6 puede verse una discretización particular del dominio espacio-tiempo para un determinado canal.

El esquema de discretización presentado en la Figura 6 corresponde a un canal con dos tramos —el I y el II— con sus correspondientes compuertas de aguas arriba de cada tramo. Cada tramo ha sido dividido en $n_I=25$ y $n_{II}=28$ secciones respectivamente. Cada una de las $nc=2$ trayectorias de compuerta ha sido discretizada con 4 periodos de muestreo,

siendo 8 la dimensión de U y $K_1=1$ y $K_F=4$. Por otro lado, la discretización temporal está indexada con k minúscula y va desde $k=k_1$ hasta $k=k_F$. En este caso particular, $k_F - k_1 + 1=37$. Finalmente, aunque sea adelantar acontecimientos, los 51 puntos grises representan los puntos donde nos va a interesar obtener los valores.

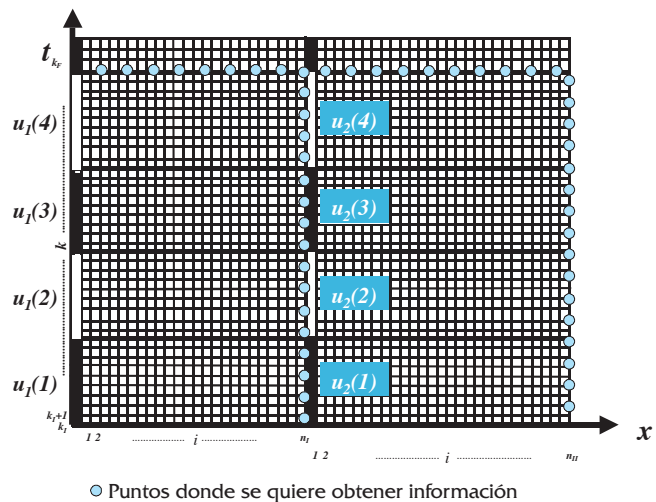


Figura 6: discretización del dominio espacio tiempo $x-t$ de un canal de dos tramos—el I y el II— con n_I y n_{II} nodos de discretización, respectivamente.

El vector de estado es el vector que contiene los valores de niveles y velocidades de todas las secciones del canal en un instante k determinado:

$$x(k) = [y_1(k), v_1(k), \dots, y_{n_I}(k), v_{n_I}(k), y_{n_I+1}(k), v_{n_I+1}(k), \dots, y_{n_I+n_{II}}(k), v_{n_I+n_{II}}(k)]^T \quad (4)$$

Todos estos vectores pueden ser compilados en uno solo llamado vector previsión:

$$X_{k_r+1}^{k_r}(U) = [x(k_r+1)^T, x(k_r+2)^T, \dots, \dots, x(k_r-1)^T, x(k_r)^T]^T \quad (5)$$

Hay que hacer notar la dependencia del vector previsión (5) del vector de trayectorias U y también que dicho vector tiene, para el caso de la figura (6), $n_x=2 \times 37 \times (25+28)=3922$ componentes.

Mediante la matriz $[C]$ —llamada de observador discreto— se pueden obtener los valores de niveles o velocidades en puntos determinados del dominio $x-t$ a partir del vector predicción:

$$Y_{k_r+1}^{k_r}(U) = [C] X_{k_r+1}^{k_r}(U) \quad (6)$$

donde $Y_{k_r+1}^{k_r}(U)$ retoma el nombre de vector previsión.

Como ya se ha dicho, este vector será usado posteriormente para definir el objetivo. Nótese que como este vector tiene 51 componentes la matriz $[C]$ tendrá una dimensión de 51×3922 . Hechas estas definiciones ya se está en disposición de definir el objetivo del control mediante la función objetivo.

Función objetivo u objetivo de control

Aunque los objetivos a conseguir en la gestión del agua en redes de canales son muy diferentes según el aprovechamiento que de ella se haga, siempre podremos describir un comportamiento del flujo ideal en términos de las variables del flujo o funciones dependientes de ellas. Un objetivo muy común, consiste en intentar mantener el nivel (por ejemplo, para evitar el efecto del mojado/secado sobre el revestimiento que le produce un rápido deterioro) en un punto mientras se hace la extracción siguiendo el hidrograma de caudal preprogramado (por ejemplo, a través de un bombeo lateral). Por lo tanto, en este caso, el objetivo de control es descrito en función de niveles.

De este modo, definimos el comportamiento ideal del flujo como una secuencia de los valores de nivel deseados para determinados puntos e instantes. Para poder continuar con el desarrollo matemático, estos valores deben incluirse dentro del siguiente *vector de comportamiento deseado*,

$$Y^* \tag{7}$$

donde cada componente $y_i^*(k)$ representa el nivel deseado para la sección i en el instante k , de tal manera que cada uno de estos valores tenga su equivalente simulado en Y de (6). Si deseamos que se produzca esta trayectoria de niveles es porque así tenemos una perfecta concordancia entre el agua suministrada por el canal (y predicha por el modelo) y la demandada, tanto desde el punto de vista de la cantidad como de la puntualidad.

Este encaje de hidrogramas tan perfecto raramente se puede conseguir porque normalmente es físicamente imposible. No obstante siempre podemos aproximarnos lo más posible. Para poder cuantificar esta aproximación definimos la siguiente función objetivo:

$$\begin{aligned}
 F(U) &= \\
 &= \frac{1}{2} (Y_{k+1}^*(U) - Y^*)^T [Q] (Y_{k+1}^*(U) - Y^*) = \\
 &= \frac{1}{2} ([C] X_{k+1}^*(U) - Y^*)^T [Q] ([C] X_{k+1}^*(U) - Y^*)
 \end{aligned} \tag{8}$$

donde $[Q]$ es una matriz cuadrada de pesos, que habitualmente acostumbra a ser la identidad dando lugar a una función de “mínimos cuadrados”.

Encontrar el conjunto de parámetros temporales U^* que minimice (8), equivale a encontrar la mejor aproximación al comportamiento deseado y por consiguiente aproximarnos lo más posible al objetivo de control. Esta es la base del problema de control y U^* es la solución.

Restricciones a las trayectorias

Valores negativos y los excesivamente grandes de la abertura de la compuerta no son físicamente posibles. Por lo tanto tenemos que incluir las siguientes restricciones de conjunto como pueden verse representadas en la Figura 5:

$$\begin{aligned}
 U_{\min_j} \leq u_j(K) \leq U_{\max_j} \quad ; \quad j = 1, \dots, nc \quad ; \\
 ; \quad K = K_1 + 1, \dots, K_f
 \end{aligned} \tag{9}$$

donde U_{\max_j} es la abertura máxima de la compuerta j y U_{\min_j} la mínima.

Por otro lado, ciertos movimientos bruscos de compuerta pueden introducir frentes de onda suficientemente grandes como para provocar desbordamientos y/o vaciados en algunos tramos. Por este motivo es recomendable la introducción de restricciones funcionales sobre el movimiento instantáneo

$$\begin{aligned}
 u_j(K+1) - u_j(K) \leq DU_{\max_j} \\
 u_j(K) - u_j(K+1) \leq dU_{\max_j} \\
 j = 1, \dots, nc \quad ; \quad K = K_1 + 1, \dots, K_f
 \end{aligned} \tag{10}$$

donde DU_{\max_j} es el máximo movimiento de abertura permitido en un instante k para una compuerta j y dU_{\max_j} es el máximo movimiento de cierre permitido.

El algoritmo “GoRoSo”

El algoritmo “GoRoSo” es un algoritmo que resuelve el problema de minimizar (8) sujeto a las restricciones (9) y (10) que tiene la estructura recursiva mostrada anteriormente. El método utilizado es de los llamados en la literatura de optimización de Lagrange-Gauss-Newton — véase como por ejemplo Fletcher (1987), Gill *et al.* (1981) y Luemberger (1984)—. Concretamente el método utilizado ha sido el “*Sequential Quadratic Problem*” (SQP) que como su nombre indica se trata de un algoritmo secuencial que resuelve un problema cuadrático en cada iteración.

Para la resolución de este subproblema se ha utilizado la estrategia llamada “Active Set Method” encontrada también en las mismas fuentes. Los detalles particulares de este algoritmo están fuera del alcance de este trabajo y pueden ser consultados en Soler (2003).

EJEMPLO ILUSTRATIVO: EL CORNING CANAL

La “American Society of Civil Engineers” (ASCE) creó un “comité de desarrollo de algoritmos para la automatización de canales”. Este comité ha establecido una serie de casos para examinar la versatilidad de diferentes esquemas de control (Clemmens *et al.*, 1998) que abarcan situaciones hidráulicas extremas representativas de un amplio rango de situaciones reales. Concretamente se presentan dos escenarios diferentes: un canal, el Maricopa Stanfield, de elevada pendiente y poca capacidad de almacenamiento, en el cual los cambios de las condiciones de flujo suceden rápidamente, incluidos cambios de régimen, y el Corning Canal, de poca pendiente y gran capacidad de transporte, en el que los cambios suceden muy lentamente dada la gran capacidad de amortiguamiento del canal. En ambos escenarios se pretende mantener el nivel a determinadas consignas. En cada una de estas situaciones se establecen dos periodos. En el primero se utiliza la información definida “a priori”, es decir, preprogramada y se pone a prueba la anticipación del algoritmo a futuros cambios conocidos en la dotación. En el segundo se pretende cualificar la capacidad de rectificación en tiempo real de la acción de control preestablecida capaz de anular los efectos producidos por extracciones no controladas, es decir, utilizando la información “a posteriori”. Finalmente, en cada uno de los cuatro problemas existen dos ensayos, el uno con dos operaciones solamente y el otro con numerosos cambios de dotación. Dada la extensión de los resultados de todos los problemas de prueba propuestos y dado el carácter ilustrativo que se le da al ejemplo, en este trabajo se presenta

solamente el caso de estudio del “Corning Canal” y se da la respuesta del algoritmo “GoRoSo” a los ensayos con cambios de dotación programados, es decir, en condiciones de flujo subcrítico y con control en *lazo abierto* (“open loop”).

La geometría del “Corning Canal”

El tramo del Corning Canal de California tiene una gran capacidad de almacenamiento con 28 Km de longitud y sección de forma trapezoidal. Está subdividido en ocho tramos con sus respectivas compuertas rectangulares y verticales colocadas aguas arriba de cada tramo. Las características comunes vienen resumidas en la siguiente tabla:

Tabla1.

Pendiente de la solera	0.0001
Coefficiente de Manning	0.02
Talud H:V	3:2
Escalón bajo compuerta	20 cm
Coefficiente de desagüe de las compuertas	0.61

Y las características propias de cada tramo en esta otra tabla:

Tabla2.

Tramo	Longitud (Km)	Anchura solera (m)	Profundidad (m)
I	7	7	2.5
II	3	7	2.5
III	3	7	2.5
IV	4	6	2.3
V	4	6	2.3
VI	3	5	1.9
VII	2	5	1.9
VIII	2	5	1.9

Entre tramos existen 9 puntos de control cuyas propiedades vienen definidas en la tabla 3:

Tanto en cabecera del canal como al final, existen sendos embalses cuyas dimensiones son suficientemente grandes como para suponer constante su nivel —3m y 1.7m, respectivamente— sobre la solera del canal.

Tabla3.

Punto de control	Tramo aguas arriba	Tramo aguas abajo	Coefficiente de desagüe	Anchura de la compuerta (m)	Abertura máxima de la compuerta (m)	Nivel de consigna en la almenara (m)
1	Embalse	I	0.61	7	2.3	3.0
2	I	II	0.61	7	2.3	2.1
3	II	III	0.61	7	2.3	2.1
4	III	IV	0.61	6	2.3	2.1
5	IV	V	0.61	6	2.1	1.9
6	V	VI	0.61	5	2.1	1.9
7	VI	VII	0.61	5	1.8	1.7
8	VII	VIII	0.61	5	1.8	1.7
9	VIII	Embalse	-	-	1.8	1.7

En cada almenara existe, a 5m de la compuertas, una salida lateral de caudal mediante bombeo programados.

Descrito el funcionamiento habitual del canal, se proponen dos ensayos que seguidamente se describen y se dan las soluciones obtenidas por el algoritmo “GoRoSo”.

Ensayo con 2 cambios de dotación

El ensayo consiste en pasar de un estado inicial estacionario, en que se bombean continuamente 1m³/s en todos los puntos de control, a un estado final también estacionario, en que los bombeos situados en las almenaras 6 y 7 (aguas abajo de los tramos V y VI) pasan a derivar 1.5m³/s y 2m³/s respectivamente. Ello puede verse en la tabla resumen (4):

Como puede verse, en este primer ensayo se fijan como condiciones iniciales las curvas de remanso dibujadas en las gráficas de la Figura (7).

En este apartado se presenten los resultados de la previsión hecha con el modelo de Saint-Venant en que se han aplicado dos opciones de control: una según una manera tradicional de operar la compuertas y la otra según el algoritmo GoRoSo desarrollado por el grupo de investigación en control de redes de canales en lámina libre de l’Escola Tècnica Superior d’Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona”.

Una vez conocidos los estados inicial de donde se parte y final a donde se quiere llegar, existen muchas alternativas posibles (muchas trayectorias de compuerta) para conseguirlo en función del número de movimientos permitidos para cada compuerta, la duración de cada movimiento, el comportamiento que se quiera obtener de las condiciones de flujo, etcétera. Para pasar del estado inicial al final, debe llevarse a cabo una serie de operaciones de apertura o cierre de compuertas de

tal forma que, sirviendo las dotaciones anteriormente descritas, se mantengan constantes los niveles en las almenaras, justo encima de los orificios de salida lateral. Así, se presentan dos maneras de proceder que llamaremos Opción 1 y Opción 2.

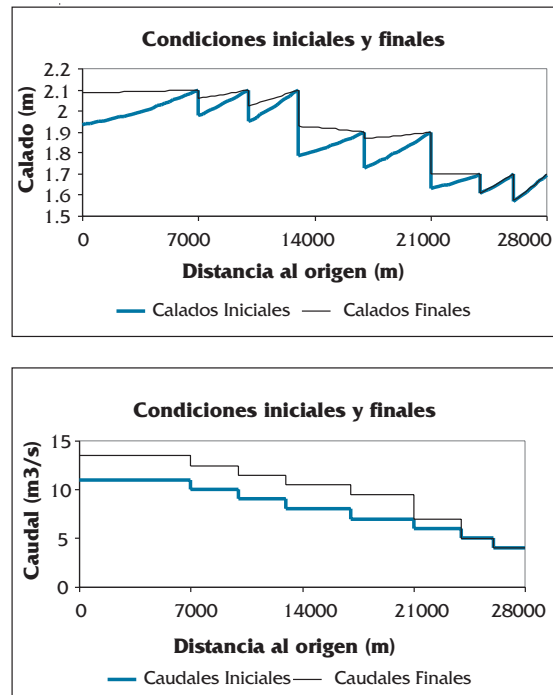


Figura 7: Condiciones iniciales y finales que se establecen en el primer ensayo del Corning Canal en lazo abierto (Clemmens et al., 1998).

Opción 1:

Esta opción es la que se ha obtenido mediante el algoritmo GoRoSo y viene representado en las gráficas de la Figura (8).

Como se puede ver en las graficas de la Figura 8, ya a partir del instante 0 s empieza a modificarse la posición de las compuertas, es decir que se tiene una total anticipación a los futuros cambios de dotación previstos a las 2 horas de iniciado el ciclo (7200 s).

Tabla 4.

Tramo	Estado Final			Estado Inicial		
	Caudal	Bombeo	Abertura	Caudal	Bombeo	Abertura
I	13.5 m³/s	1 m³/s	676 mm	11 m³/s	1 m³/s	634 mm
II	12.5 m³/s	1 m³/s	1343 mm	10 m³/s	1 m³/s	1162 mm
III	11.5 m³/s	1 m³/s	1158 mm	9 m³/s	1 m³/s	1023 mm
IV	10.5 m³/s	1 m³/s	1057 mm	8 m³/s	1 m³/s	902 mm
V	9.5 m³/s	1.5 m³/s	1219 mm	7 m³/s	1 m³/s	964 mm
VI	7 m³/s	2.0 m³/s	815 mm	6 m³/s	1 m³/s	921 mm
VII	5 m³/s	1 m³/s	687 mm	5 m³/s	1 m³/s	1031 mm
VIII	4 m³/s	1 m³/s	518 mm	4 m³/s	1 m³/s	841 mm

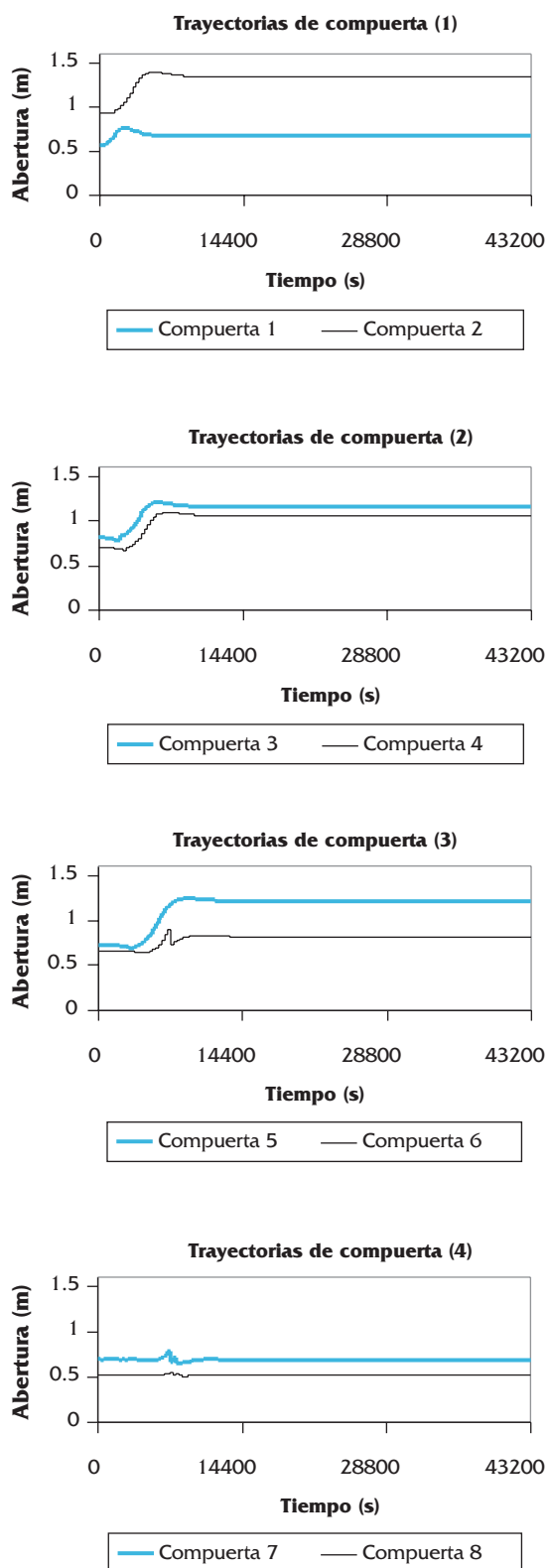


Figura 8: Trayectorias de compuerta ensayadas en el modelo resultado de la aplicación del algoritmo GoRoSo al primer ensayo del "Corning Canal" en lazo abierto.

Opción 2:

Una manera de realizar el cambio de situación, es mediante un único e instantáneo movimiento en un instante suficientemente avanzado en el tiempo y según la experiencia del comportero. Para introducir suficiente anticipación y hacerlo comparable con la Opción 1, se propone hacerlo ya desde el instante 0 s:

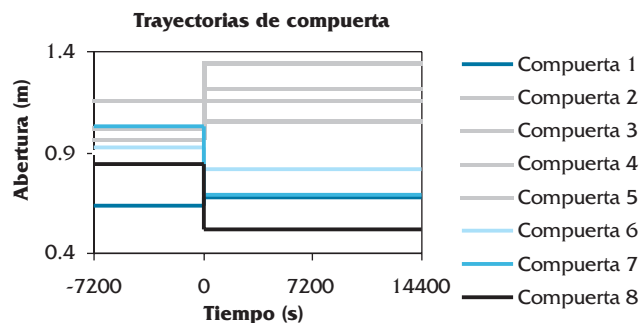


Figura 9: Trayectorias de compuerta tradicionales ensayadas en el modelo correspondientes al primer ensayo del "Corning Canal" en lazo abierto. Desde el estado estacionario inicial a los 0s de la simulación las compuertas son movidas a la posición estacionaria final mediante una sola operación.

Resultados simulados de las dos opciones

Mediante el modelo de Saint-Venant se ha obtenido la descripción matemática de la transición desde el estado inicial hasta el final cuando se aplican las trayectorias de compuerta definidas anteriormente como opción 1 y opción 2. La manera ideal de comprender lo que cada una de estas opciones representa sería verlas evolucionar en soporte informático en una animación. A pesar de ello, en soporte papel, es posible hacer una representación gráfica en tres dimensiones que permita imaginar tal animación.

Las variables que describen el flujo de agua en canales, llamadas variables hidrodinámicas, son dependientes del espacio y el tiempo y son dos: el calado (o nivel cuando se hace referencia a una cota de terreno fija) dado en m y la velocidad media de una sección de agua dada en m/s . De ellas, la más tangible es la del calado (nivel de agua respecto del fondo del canal en cada punto) y es esta variable la elegida para describir el transitorio. Los resultados se presentan por tramos independientes para evitar el exceso de información que enmascara el efecto temporal.

Evolución de calados de la Opción 1

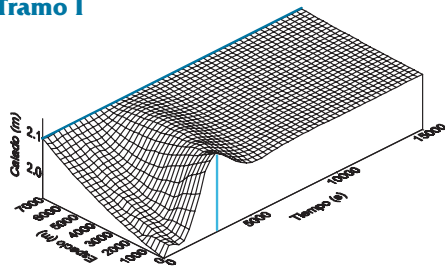
En la siguiente gráfica se dibuja la evolución de los calados que son la respuesta a las trayectorias definidas como Opción 1.

De estas gráficas cabe destacar tres cosas importantes:

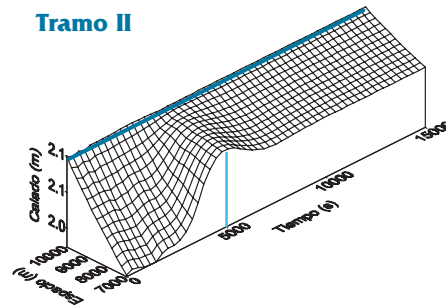
1. La primera es el significado de la evolución que tiene la línea vertical. Esta línea marca el tiempo en que aguas arriba de cada tramo se produce el máximo calado. Como puede verse, esta línea azul va avanzando en el tiempo conforme se va descendiendo tramo a tramo, esto es lo que se llama frente de onda. Este frente desaparece prácticamente cuando éste llega al final del sexto tramo ($Espacio = 24Km$).

Figura 10: Calados predichos por el modelo cuando se le han aplicado las trayectorias de compuerta de la Opción 1.

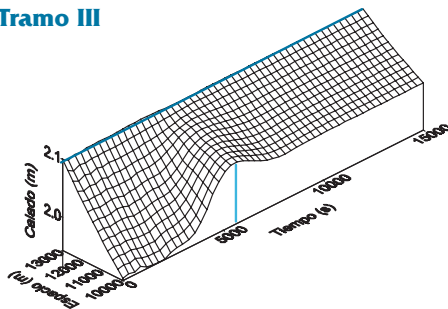
Tramo I



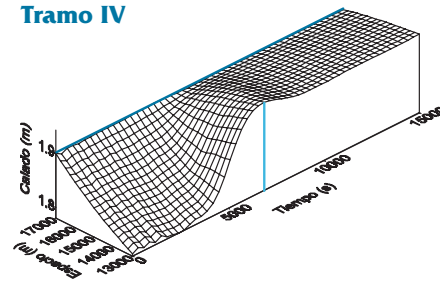
Tramo II



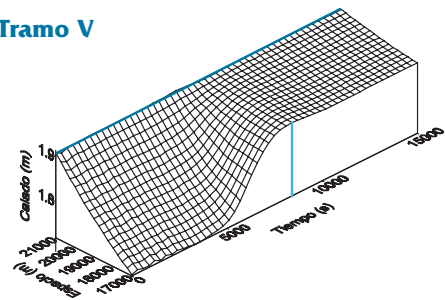
Tramo III



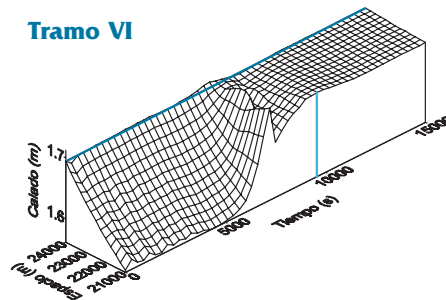
Tramo IV



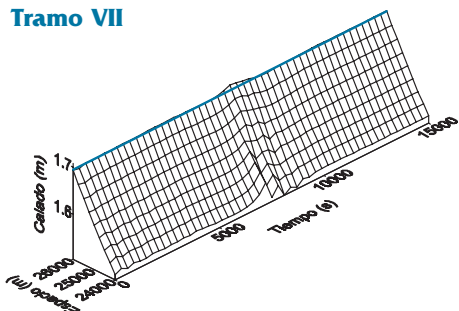
Tramo V



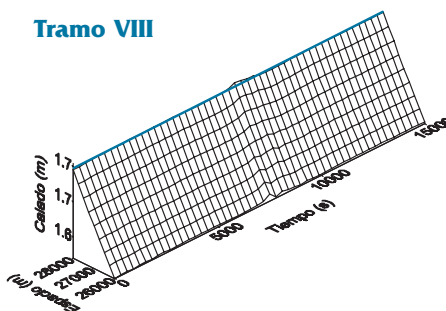
Tramo VI



Tramo VII



Tramo VIII



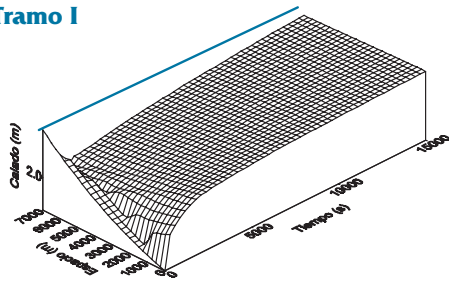
Es decir, se mantienen no alterados los niveles de los tramos séptimo y octavo. Esto tiene especial importancia si se considera el frente como un transportador que envía exactamente el agua que se necesita de mas en los puntos aguas debajo de los tramos quinto (*Espacio = 21Km*) y sexto (*Espacio = 24Km*) (recordar los incrementos de extracción de $1m^3/s$ y de $1.5m^3/s$, respectivamente) evitando de esta manera una

escorrentía de agua superior hacia los siguientes tramos y al final hacia el embalse. Dicho en otras palabras, el frente de onda llega a los puntos kilométricos 21 y 24 en el preciso momento en que se incrementa la extracción. Como se puede comprobar, la anticipación es total.

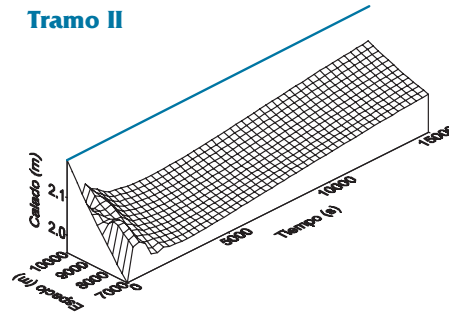
2. Las líneas horizontales que están dibujadas en cada final de tramo indican el objetivo a conseguir,

Figura 11: Calados predichos por el modelo cuando se le han aplicado las trayectorias de compuerta de la Opción 2.

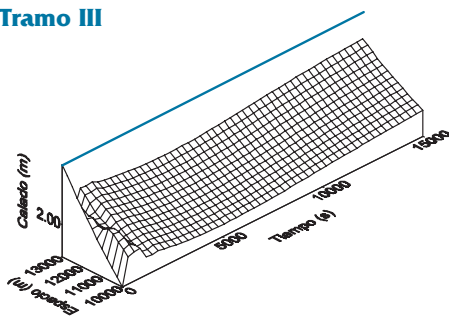
Tramo I



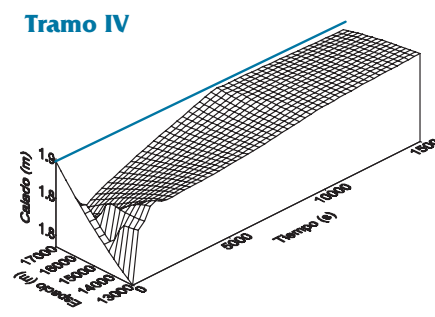
Tramo II



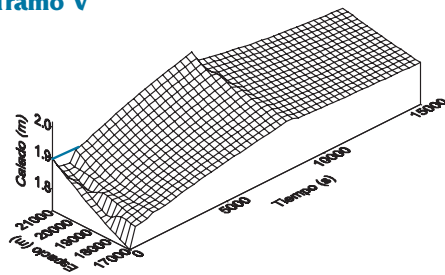
Tramo III



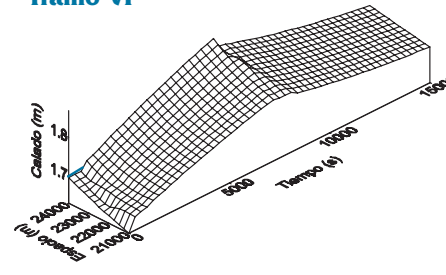
Tramo IV



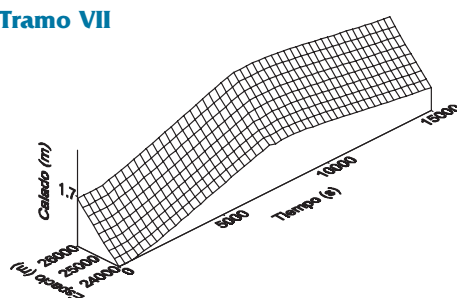
Tramo V



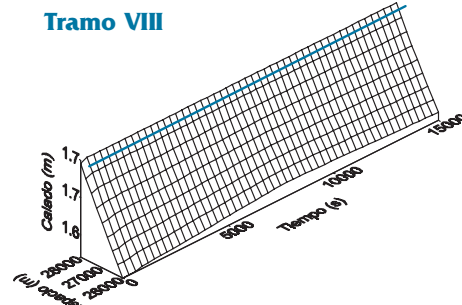
Tramo VI



Tramo VII



Tramo VIII



es decir el mantenimiento de los calados en estos puntos. Como se puede comprobar, el nivel en estos puntos se mantiene prácticamente no alterado a lo largo del tiempo cumpliéndose el objetivo previsto. Y por lo tanto las bombas de extracción lateral de agua trabajan a régimen constante con el consiguiente ahorro de energía y el alargamiento de su vida útil.

- Mucho antes del instante $15000s$, es decir muy rápidamente, el sistema llega a la estacionariedad, es decir al estado final.

Como curiosidad hay que notar que en la gráfica correspondiente al sexto tramo se puede ver la bifurcación en dos subfrentes que sufre el frente cuando llega al punto aguas arriba del tramo: un subfrente queda extinguido prácticamente (indicado con una línea azul vertical) y la otra continúa aguas abajo. Este comportamiento es debido a que aguas arriba del tramo se produce un cambio de dotación y aguas abajo el otro.

Evolución de calados de la Opción 2

Como se puede comprobar en esta opción ninguno de los tres comentarios expresados anteriormente son válidos aquí. Como, en el ejemplo, la extracción lateral de agua se hace mediante bombeos, con las variaciones tan pronunciadas de nivel aguas abajo de cada tramo se pueden mantener, no sin dificultades, las dotaciones requeridas en cada instante. Pero si las extracciones hubieran sido hechas a través de vertederos, habría habido momentos en que el calado no hubiera sido suficiente como para sacar agua del canal.

Como se puede ver en las figuras correspondientes a los tramos quinto y sexto, se producen rebotes de frentes que remontan el canal. Este hecho es indicativo de la lejanía en que se está de la consecución del estado final. En posteriores previsiones más largas de esta Opción 2 se ha visto que para llegar al estado estacionario final se necesitaban más de 48 horas de funcionamiento. Esto es un gran handicap para esta forma tradicional de regulación de canales.

Son muy útiles los hidrogramas que visualizan la evolución de una variable hidrodinámica a lo largo del tiempo en cierto punto del canal. Puesto que las gráficas de estado inicial y final dibujadas anteriormente se pueden considerar perfiles longitudinales para cierto instante, los

hidrogramas pueden considerarse como perfiles temporales para una cierta sección del canal. Para visualizar lo que pasa en el extremo aguas abajo del canal en cuanto a caudales se refiere, se presenta aquí la siguiente gráfica comparativa:

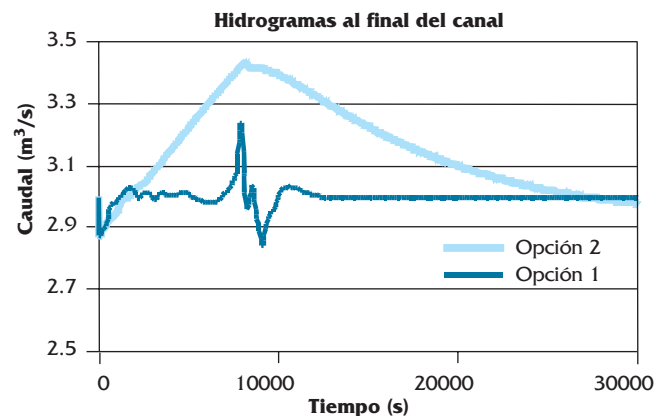


Figura 12: Hidrogramas de caudal predichos para el extremo aguas abajo del canal según las dos opciones ensayadas.

Como se puede ver, a parte de pequeñas oscilaciones durante cortos periodos de tiempo, el caudal saliente que es generado por las trayectorias de compuerta de la Opción 1 no se aleja demasiado de los $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Así, si durante el periodo de $27000s$ (unas 7 horas) se tiene que escurrir un total de 108000 m^3 por imperativo ecológico, según la Opción 1 se evacúan 107944 m^3 y según la Opción 2, 112944 m^3 . Esto significa una pérdida de $4691 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, un $4,34\%$ de pérdidas respecto del total gestionado, por parte de la Opción 2 y un déficit de 53 m^3 que equivale prácticamente a un 0% de error. Y esto considerando solo dos operaciones, dos cambios de dotación.

Ensayo con 6 cambios de dotación

En este ensayo se pide que los cambios de posición de compuerta sean muy grandes y en un tiempo récord. El ensayo también consiste en pasar de un estado inicial estacionario —en el que el canal prácticamente no lleva agua tal y como pasa durante la noche cuando no hay consumo— a un estado final también estacionario al cabo de dos horas en el que el canal trabaja a pleno rendimiento llegando casi a su capacidad máxima de transporte. Esta situación, aunque habitual, es hidráulicamente extrema porque los cambios de caudal exigidos en los puntos de control son numerosos y de gran magnitud. Los cambios de dotación de 6 bombeos se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 5.

Tramo	Estado Final			Estado Inicial		
	Caudal	Bombeo	Abertura	Caudal	Bombeo	Abertura
I	13.7 m ³ /s	1.7 m ³ /s	690 mm	2.7 m ³ /s	0.2 m ³ /s	108 mm
II	12.0 m ³ /s	1.8 m ³ /s	1247 mm	2.5 m ³ /s	0.3 m ³ /s	189 mm
III	10.2 m ³ /s	2.7 m ³ /s	958 mm	2.2 m ³ /s	0.2 m ³ /s	166 mm
IV	7.5 m ³ /s	0.3 m ³ /s	628 mm	2.0 m ³ /s	0.3 m ³ /s	140 mm
V	7.2 m ³ /s	0.2 m ³ /s	742 mm	1.7 m ³ /s	0.2 m ³ /s	137 mm
VI	7.0 m ³ /s	0.8 m ³ /s	815 mm	1.5 m ³ /s	0.3 m ³ /s	135 mm
VII	6.2 m ³ /s	1.2 m ³ /s	939 mm	1.2 m ³ /s	0.2 m ³ /s	142 mm
VIII	5.0 m ³ /s	5.0 m ³ /s	687 mm	1.0 m ³ /s	1 m ³ /s	118 mm

Este ensayo también ha servido para mostrar el efecto del aumento del grado de restricción a los movimientos de compuerta. En este sentido se han realizado cuatro pruebas de diverso grado de restricción definidas como en (7):

Tabla 6:

Prueba	Restricción
1.-	$DU_{max_j} = d_{max_j} = 0.9 \text{ m}$
2.-	$DU_{max_j} = d_{max_j} = 0.2 \text{ m}$
3.-	$DU_{max_j} = d_{max_j} = 0.1 \text{ m}$
4.-	$DU_{max_j} = d_{max_j} = 0.05 \text{ m}$

El algoritmo GoRoSo ha arrojado los siguientes resultados:

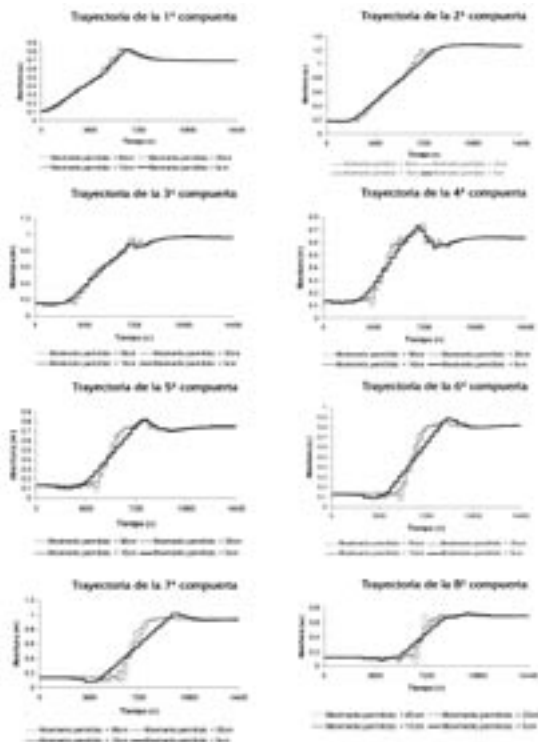


Figura 13: Trayectorias de compuerta obtenidas por el algoritmo GoRoSo para el problema del “Corning Canal” en lazo abierto y cuando se producen muchos cambios de dotación. Los resultados son presentados según cuatro grados de restricción de los movimientos de compuerta.

Hechas la previsiones para los cuatro grupos de trayectorias de compuerta mostradas en las ocho gráficas de la Figura (12), se han obtenido los siguientes resultados:

- Valores de la función objetivo definida como en (5):

Tabla 6.

Prueba	dU_{max} (cm)	DU_{max} (cm)	$F(U)$	Restricciones activas	Iteraciones
1	90	90	1.274×10^{-4}	0	12
2	20	20	4.743×10^{-3}	3	12
3	10	10	7.031×10^{-3}	25	12
4	5	5	1.947×10^{-2}	89	12

- Calados predichos para la trayectoria de compuerta restringida a movimientos de menos de 5cm:

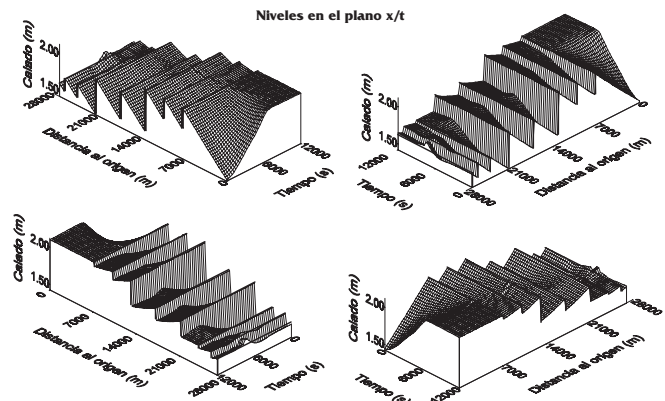


Figura 14: Calados obtenidos por el modelo de predicción cuando se le aplican las trayectorias de compuerta restringidas a movimientos inferiores a 5cm.

Cabe decir que las cuatro pruebas dan unos excelentes resultados superando en mucho un valor considerado como bueno. A medida que disminuye el grado de restricción a los movimientos de compuerta, uno se acerca cada vez más al mínimo 0 de la función objetivo, o lo que es lo mismo uno consigue con más intensidad el objetivo de control.

A la vista de los resultados:

1. En las cuatro gráficas presentes en cada una de las figuras 14 y 15 —que representan la misma superficie en 3D pero vista desde cuatro puntos de vista diferentes— se puede ver el calado y el caudal existentes en cada instante y en cada posición del canal. En los lugares donde esta superficie es vertical hay una almenara o punto de control, con su bombeo correspondiente, el cual es el causante del desnivel.
2. Por el contrario, cuando la superficie es horizontal, el caudal se mantiene constante tanto en el espacio como en el tiempo. En este caso existen claramente dos zonas diferenciadas en forma de altiplano. Estas dos zonas indican los dos estados estacionarios definidos como inicial y final.
3. Se puede ver también una zona situada entre los altiplanos que corresponde al transitorio provocado por las trayectorias de compuerta.
4. La misma superficie de caudales aparece como una superficie en dos dimensiones en la gráfica de la parte baja de la Figura 15. Los tonos claros indican caudales pequeños y los colores oscuros caudales grandes.
5. Las líneas discontinuas marcan aproximadamente el inicio y el final del transitorio y la banda que generan corresponde aproximadamente a la separación de los mencionados altiplanos.
6. Las líneas gruesas horizontales marcan las posiciones de los puntos de control.
7. Como se puede comprobar, las zonas de fuera del transitorio presentan una tonalidad constante dependiendo del tramo.

Aspectos computacionales

Para el ejemplo del problema-test del “Corning Canal” se ha definido una trayectoria de compuerta para todo el horizonte de predicción mediante 144 tramos de 300s (=5min.) cada uno, lo que significan 144 tramos/trayectoria \times 8 trayectorias = 1152 tramos, es decir, la dimensión del vector U es $n = 1152$. Por otro lado, el número de puntos donde se quiere ajustar el calado $Y(U)$ al comportamiento deseado Y^* , es también $m = 1152$.

Con un PC tipo Pentium III a 650MHz, con 128Mb de memoria RAM trabajando sobre Windows 98 y utilizando como solución inicial U_0 las aberturas del estado estacionario final, el tiempo de cálculo ha sido de unos 30 minutos para cada ensayo, de los cuales un 70% se han utilizado para el cálculo de la matriz jacobiana de $F(U)$, $J(U)$.

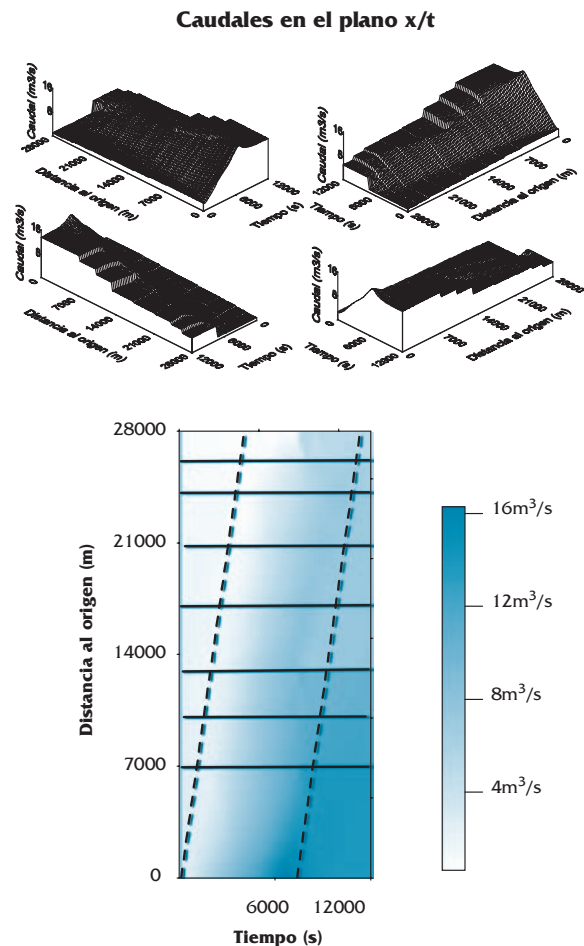


Figura 15: Caudales obtenidos por el modelo de predicción cuando se la aplican las trayectorias de compuerta restringidas a movimientos inferiores a 5cm.

CONCLUSIONES

A modo de resumen, se pueden concluir los siguientes puntos:

1. Se ha presentado un algoritmo de control en lazo abierto para la definición de las trayectorias que hay que seguir en las aberturas de compuerta de un canal de riego, con objeto de satisfacer unas consignas de nivel y unas demandas de caudal conocidas a lo largo de un cierto horizonte de tiempo.

El algoritmo se basa en la minimización de una función objetivo, obtenida como diferencia entre los niveles existentes en el canal y los niveles deseados (consignas). En el proceso de minimización de esta función objetivo se utiliza una matriz $J(U)$ que representa las influencias sobre todas las secciones en que se discretiza el canal de cualquier abertura de compuerta. Dicha matriz $J(U)$ se obtiene a partir de un proceso numérico de discretización en diferencias finitas de un esquema de características curvas que representa las ecuaciones de Saint-Venant.

2. Se ha aplicado dicho proceso a dos problemas de control de canales de un caso de referencia propuesto por el ASCE Task Committee, en concreto el Corning Canal. El proceso proporciona una serie de trayectorias de compuerta que cumplen los objetivos de control y de caudal deseados. El procedimiento indicado alcanza en muchos casos un valor cero de función objetivo. La definición de la abertura de compuerta como una función definida por intervalos simplifica muchísimo el proceso de resolución.
3. El algoritmo GoRoSo es la herramienta adecuada para la programación de las trayectorias de compuerta del siguiente ciclo de riego y cuando se conocen las demandas y los comportamientos deseados para el horizonte de predicción establecido, es decir, la herramienta adecuada en control en lazo abierto.
4. Un estudio previo diario utilizando diferentes grados de restricción y diferentes intervalos de muestreo puede ser una herramienta de ayuda para los responsables de la gestión del agua.
5. La anchura tan estrecha de la banda del transitorio entre los dos estados estacionarios da a entender que el conjunto de trayectorias obtenidas mediante GoRoSo son las de menor tiempo de operación.
6. Como el mantenimiento de niveles en los puntos de control es prácticamente total se puede asegurar que la anticipación a cambios de demanda es total también. Ello tiene como consecuencia la reducción de ciclos de mojado/secado del canal, lo que aumenta la durabilidad del material de revestimiento y por ende del canal en su conjunto.

Finalmente, como desarrollos futuros de esta metodología, es posible incorporar nuevas restricciones a los movimientos de compuerta (forzar que la compuerta nunca salga del agua para comunicar la inercialidad del flujo en lámina libre al controlador, evitar creación de grandes frentes de onda, etcétera) y también el desarrollo de las demás etapas de control propuestas al comienzo de este artículo.

REFERENCIAS

- Clemmens, A.J., Kacerek, T.F., Grawitz, B., Schuurmans, W., (1998), "Test cases for canals control algorithms", *Journal of Irrigation and Drainage*", ASCE pp. 23-30.
- Clark, I.F., (1972), "Automatic Control of Canals", *VIII Congress of ICID*, Q.28.2.R.1, Varna
- Clemmens, A.J., Replogle J.A., (1989), "Control of irrigation canal networks", *J. of Irrig. and Drain.*, ASCE, num.115(1), 96-110.
- Fletcher, R., (1987), *Practical Methods of Optimization*, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, U.K.
- Gill, P.E., Murray, W., Wright, M.H., (1981), *Practical Optimization*, Academic Press Inc., Scotland.
- Gómez, M., (1988), *Contribución al estudio del movimiento variable en lámina libre en las redes de alcañterillado*, Tesis doctoral UPC, Catalunya.
- Goussard, J., (1993), *Automation of Canal Irrigation Systems*, Int. Com. on Irrig. and Drain. (ICID), New Delhi.
- Krandall, S.H., (1956), *Engineering Analysis-A Survey of Numerical Procedures*, McGraw-Hill, New York.
- Liria, J., (2001), *Canales hidráulicos. Proyecto, construcción, gestión y modernización*, Col. Ing.de Cam., Can. y Puertos, Madrid.
- Luemberger, D.G., (1984), *Linear and Nonlinear Programming*, 2nd. Ed., Addison-Wesley, Massachusetts, US.
- Martín-Sánchez, J.M., Rodellar, J., (1996), *Adaptive Predictive Control: from the concepts to plan optimization*, Series in Systems and Control Engineering, Prentice Hall.
- Ministerio de Industria y Medio Ambiente, (1998), *El Libro Blanco del Agua en España*.
- Soler, J., (2003), "Contribució a l'estudi del control de canals de regadiu per mitjà de mètodes numèrics de programació no lineal. Aplicació al càlcul de les trajectòries de referència", Tesis doctoral UPC, Catalunya.

