

GoRoSoBo: Un algoritmo predictivo de control para canales de riego en tiempo real

E. Bonet Gil, M. Gómez Valentín,

*Departamento de ingeniería hidráulica, marítima y ambiental. Sección de hidráulica.
Universidad Politécnica de Cataluña. Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España.*

J. Soler Guitart

*Departamento del Agua. Universidad de la República, Gral. Rivera 1350, Salto, Uruguay,
C.P.:50000.*

1. Introducción

El agua es un bien escaso y necesario para la vida. Es un recurso del cual hacemos un uso habitual de él, en la industria, como fuente de energía, en la agricultura, como consumo propio, etc., en numerosas actividades las cuales sería imposible realizar sin acceso al agua. Un recurso tan preciado en zonas con escasez por sequías prolongadas constituye un problema serio. Concretamente en el sector de la agricultura provocaría un descenso de los cultivos y la incapacidad de cubrir las necesidades alimentarias de la zona.

La agricultura es una parte importante en la cadena alimentaria, y los recursos hídricos para la agricultura son imprescindibles. Un grave problema en la agricultura son los bajos rendimientos de los cultivos, muchas veces relacionados con sistemas de transporte de agua poco eficientes. La gestión de los recursos hídricos debe ser estricta para obtener rendimientos competitivos, y aun con más motivos, en países con sequías prolongadas y escasez de éste recurso. Para mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte de agua, como son los canales de regadío, es necesario invertir en la automatización de estos canales.

Por todo ello, se define un esquema general de control, con el cual pretendemos optimizar la gestión de los recursos hídricos destinados a los cultivos. La gestión del canal se inicia con la programación de las demandas hídricas de los agricultores teniendo en cuenta las necesidades de los diferentes cultivos durante un ciclo de riego. Con esta información, un algoritmo en lazo abierto (por ejemplo, GoRoSo (Soler, 2003)) sería capaz de calcular las trayectorias de compuerta o acciones de control para establecer los hidrogramas requeridos. En un caso ideal, los agricultores obtendrían los caudales demandados y la gestión de los recursos sería la óptima. El problema surge cuando se realizan extracciones de caudal en el canal no programadas, desviando el estado deseado

del canal a un estado desconocido por el gestor. En esta situación, los regantes no obtendrían los hidrogramas previamente asignados antes del inicio del ciclo de riego.

Para evitar esta situación, proponemos un esquema de control, donde el algoritmo CSI (Bonet, 2015), (Soler et al., 2013), establecería el estado hidrodinámico del canal en tiempo real (velocidad y calado en todas las secciones transversales del canal) y las extracciones reales de caudal en el canal. Esta información obtenida por CSI sería muy valiosa para un control predictivo en tiempo real, como es GoRoSoBo (Bonet, 2015), el cual rectificaría las trayectorias de compuerta en tiempo real y de esta manera, reestablecería el estado deseado por el gestor y los regantes obtendrían los hidrogramas previamente asignados.

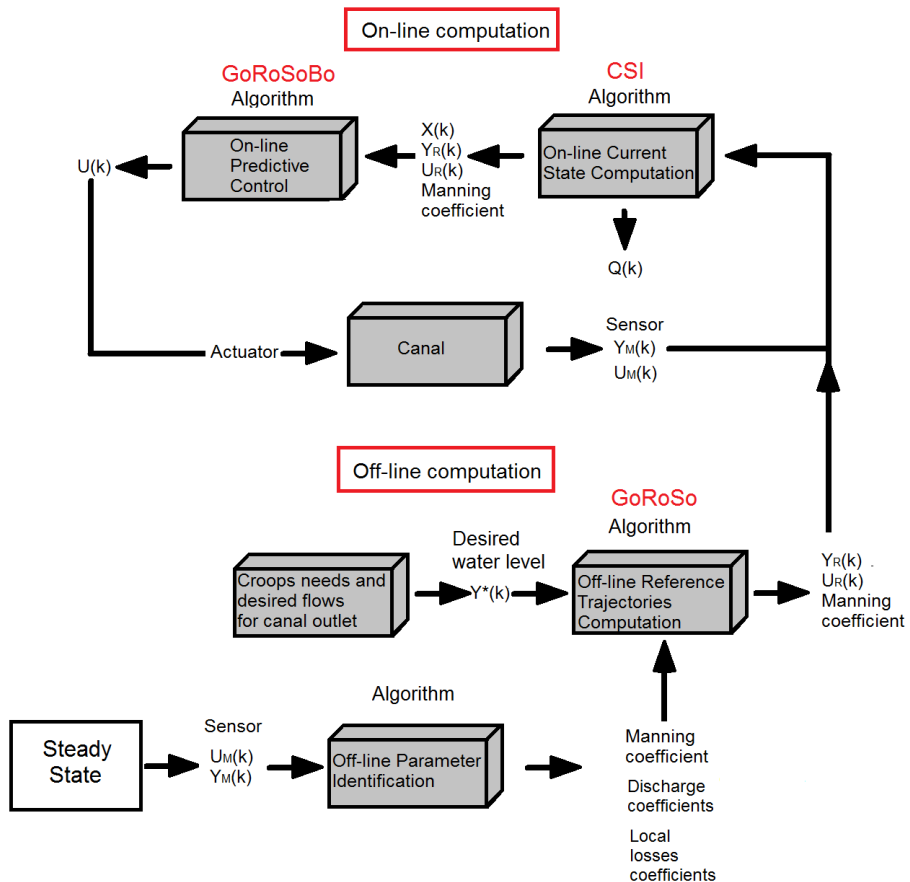


Figura 1. Esquema general de control para la gestión de un canal (Bonet, (2015)).

2. Algoritmo: GoRoSoBo

El algoritmo GoRoSoBo (Gómez, Rodellar, Soler, Bonet) es la herramienta esencial en la gestión de un canal, un algoritmo de control centralizado en lazo cerrado que opera en tiempo real.

El algoritmo GoRoSoBo soluciona un problema inverso clásico, en que las posiciones de las compuertas son consideradas como la incógnita a identificar, calculadas a partir de las desviaciones de nivel en diferentes puntos del canal. El algoritmo se basa en el método de optimización no lineal con restricciones de Lagrange-Newton (SQP) junto al active set method para solucionar el problema inverso (Bonet, 2015).

En la resolución del problema inverso, el algoritmo calcula las trayectorias de compuerta óptimas teniendo en cuenta un error de nivel de agua con la ayuda de la matriz HIM (Matriz de Influencia hidráulica, Soler (2003)). Esta matriz establece la influencia de un movimiento de compuerta (ΔU) en la lámina libre (ΔY), en todas las secciones del canal durante un horizonte de predicción.

$$[HIM(U)] = \left[\frac{\partial Y}{\partial U} \right] \quad [1]$$

$$\Delta Y = [HIM(U)] \Delta U$$

Cada elemento de la Matriz de Influencia hidráulica (HIM) se obtiene a partir de las ecuaciones completas de Saint Venant junto con las ecuaciones de tipo algebraico que describen el flujo a través de estructuras hidráulicas como compuertas, vertederos frontales o laterales, sifones, transiciones, saltos, etc.

A partir de la HIM podríamos establecer los cambios en el estado hidrodinámico del canal (calado y velocidad) debido a un movimiento de compuerta en cualquier sección ($i, i+1, i+2, i+3$) de una canal en un cierto intervalo de tiempo (Figura 2).

Debido que las ecuaciones de flujo no tienen solución analítica conocida, tenemos que discretizar el dominio espacio/tiempo en una malla de cálculo y encontrar allí la solución de las ecuaciones mediante técnicas numéricas. Como mostramos en la figura 3, donde podemos ver la influencia de un movimiento de compuerta ($\Delta U_i(0)$) en el espacio/tiempo. Las trayectorias de compuerta se consideran constantes durante el período de operación ΔT . Los periodos de extracción son denotados por K y los correspondientes instantes por $T^K = K \times \Delta T$.

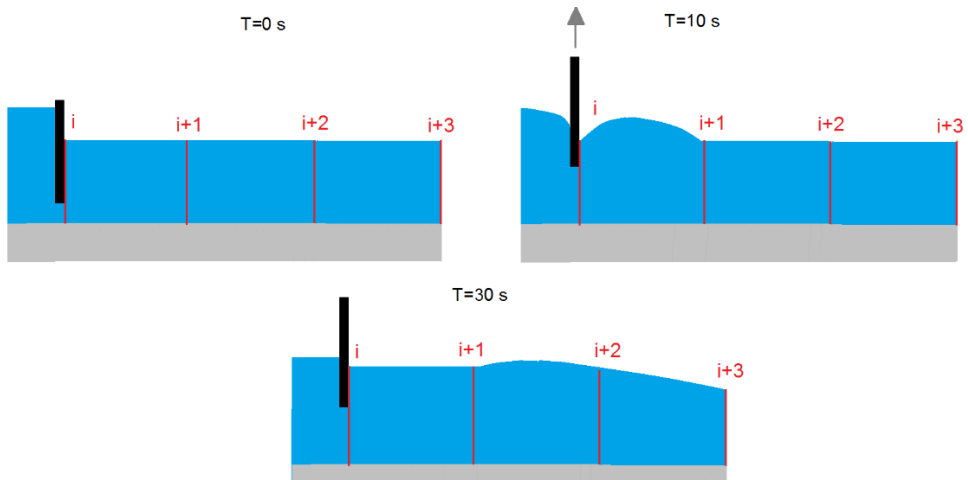


Figura 2. Vista general de la influencia de un movimiento de compuerta en el estado hidrodinámico de un canal.

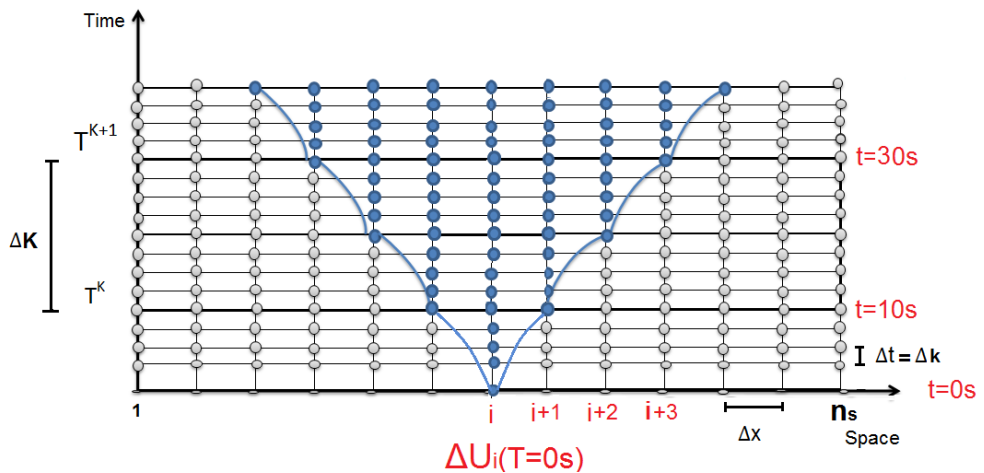


Figura 3. Influencia de un movimiento de compuerta en varios puntos del dominio espacio/tiempo de un canal discretizado en una malla computacional. Obsérvese que "K" mayúscula denota intervalo de tiempo de control y "k" minúscula denota instante de tiempo de simulación.

2.1 Definiciones

Se define el **vector de salidas predichas** Y , como aquel que contiene los valores de calado en determinadas secciones del canal (n_c) en cada periodo de operación K , durante un horizonte de predicción. En nuestro problema inverso, el vector $Y(0)$ será la condición inicial introducida. De esta manera, podemos definir el vector de salidas predichas de un canal durante un horizonte de predicción como:

$$Y = [y_1(1)^T, \dots, y_{n_c}(K_F - 1)^T, y_{n_c}(K_F)^T]^T \quad [2]$$

Donde $y_i(K)$ es el calado en la sección “i” para el periodo de operación K, K_F es el periodo de operación final del horizonte de predicción. La dimensión de este vector es $n_Y = K_F \times n_c$.

Ahora, consideremos un nuevo vector que contiene todos los valores de calados deseados en los puntos de control para el instante K. Este vector puede ser compilado para todos los periodos de operación del horizonte de predicción, y de esta manera definir el **vector de comportamiento deseado** $Y^*(K)$, también de dimensión n_Y , como sigue:

$$Y^* = [y_1^*(1), y_1^*(2), \dots, y_{n_c}^*(K_F - 1), y_{n_c}^*(K_F)]^T \quad [3]$$

Las trayectorias de compuerta se definen mediante funciones temporales a tramos (tipo Piecewise), ya que se consideran constantes durante el periodo de operación ΔT . De este modo, las trayectorias de compuerta son compiladas en un único vector denominado **vector trayectoria de compuerta** (U) como sigue:

$$U = [U_1(1), \dots, U_{n_g}(1), \dots, U_1(K_F), \dots, U_{n_g}(K_F)]^T \quad [4]$$

Siendo n_g el número de compuertas en el canal. La dimensión de este vector es $n_U = K_F \times n_g$.

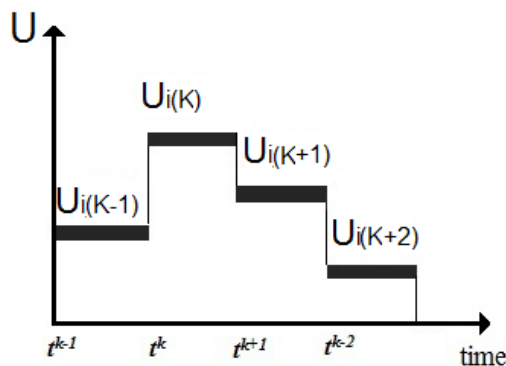


Figura 4. Representación matemática de la trayectoria de una compuerta.

2.2 Función objetivo

El objetivo consiste en conseguir que el vector de salidas predichas se parezca en mayor medida al vector comportamiento deseado mediante la manipulación del vector de trayectorias de compuerta. En términos matemáticos, el objetivo consiste en calcular el vector de trayectorias de compuerta que minimiza la siguiente función objetivo:

$$J(U) = \frac{1}{2} (Y(U) - Y^*)^T [W] (Y(U) - Y^*) \quad [5]$$

Donde W es una matriz de pesos de dimensión $n_Y \times n_Y$.

3. Verificación numérica

GoRoSoBo ha sido ensayado en un ejemplo numérico. La geometría del canal propuesto en este ejemplo se basa en el trabajo de Bautista (Bautista et al. 1997). Este canal fue utilizado por diferentes autores como Wylie (1969), Liu (1992), Chevereau (1991) y Soler (2003). La geometría del canal y las demandas programadas en el ensayo realizado se basan en el ejemplo de Liu (1992).

Además de ensayar GoRoSoBo con este ejemplo, analizaremos los resultados y los compararemos con los obtenidos por un algoritmo en lazo abierto como es GoRoSo, el cual establece las trayectorias de compuerta antes del inicio del ciclo de riego, teniendo en cuenta únicamente las demandas de riego previstas por los agricultores.

De esta manera, se evaluará la gestión de un canal con uno u otro controlador, en el caso que las demandas previstas puedan ser alteradas por extracciones “piratas” durante el ciclo de riego.

3.1 Descripción geométrica

El canal tiene una sección trapezoidal con un ancho de 5 m, pendiente de los hastiales de 1,5 (H:V) y una profundidad de 2 m. El canal está compuesto por un único tramo de 2500 m, con una pendiente longitudinal del 0,1 % y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,025. El canal es controlado por una única compuerta situada aguas arriba con un ancho de 5 m y una altura de 2 m. Al final del canal hay un orificio de extracción, un aliviadero lateral de emergencia, una estación de bombeo y un punto de control, donde se toman

mediciones del nivel de agua, y de esta manera podremos definir el vector de calados deseados.

El canal se ha discretizado en secciones cada 25 metros, y por lo tanto definiremos 101 nodos ($n_s = 101$). El periodo de operación es de 5 minutos y la duración del horizonte de predicción es de 8 horas, por lo tanto definiremos 96 periodos de regulación ($K_F = 96$).

3.2 Escenario

La condición de contorno aguas arriba del canal es fijada por una compuerta que controla el agua introducida en el canal de un embalse aguas arriba con un nivel de agua constante (3 metros). Las condiciones de contorno aguas abajo del canal dependen del flujo extraído por el orificio y la perturbación introducida, las cuales definimos en el siguiente apartado.

Las condiciones iniciales se definen para un determinado estado estacionario, donde el caudal a través de la compuerta es de $5\text{m}^3/\text{s}$, y el nivel en el punto de control (calado deseado) tiene un valor de 1,6 metros.

3.3 Perturbación

En la siguiente gráfica mostramos las demandas hídricas previstas por los agricultores, y por lo tanto, conocidas antes del inicio del ciclo de riego, con una curva discontinua de color azul. En cambio, las demandas desconocidas las introduciremos con un grupo motobomba, situado al final del canal, y las hemos representado por una curva de color naranja.

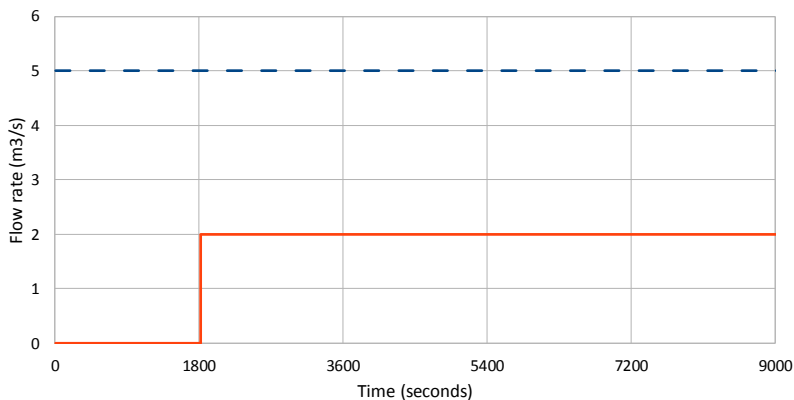


Figura 5. Entregas programadas y no programadas durante el ciclo de riego.

3.4 Resultados

Al comienzo de la prueba, el caudal en el canal es constante así como las extracciones y el nivel en el punto de control. Después de los primeros treinta minutos (1800 s), una

perturbación se introduce en el sistema. El algoritmo no tiene ninguna notificación hasta el próximo período de regulación (2100 s), una vez que el nivel de agua es medido en el punto de control, y éste se ha reducido en 10 cm., de 1,6 m a 1,50 m (Figura 8).

Una vez se realizan las mediciones del nivel de agua en el instante 2100 s, éstas se envían al algoritmo CSI, y éste calcula las extracciones reales (Figura 6) y el estado hidrodinámico en todo el canal. Todos estos datos son enviados a GoRoSoBo que rectificará la trayectoria de compuerta (figura 7) para mantener el nivel de agua constante en el punto de control. Como podemos ver en la figura 8, el nivel de agua no aumenta hasta tres períodos de operación después de que se introdujo la perturbación (2700 s), debido a que una vez abrimos la compuerta (2100 s) y generamos una onda que avanza aguas abajo, ésta no alcanzará el punto de control hasta el instante 2700 s. Una vez la onda generada alcanza el punto de control, el nivel aumenta recuperando rápidamente el calado deseado (1,6 metros) en el instante 3700 s (Figura 8).

Como hemos visto, la desviación máxima entre el nivel de agua medido y deseado en el punto de control es cercano a los 27,5 cm., (de 1,6 cm. a 1,325 cm.), por lo que el movimiento de compuerta debe ser muy importante para reducir rápidamente esa desviación (Figura 7). La posición de la compuerta varía de 0,125 a 0,34, en tan solo un período de regulación (1800-2100 s), donde la posición de la compuerta se define como:

$$Posición_compuerta = \frac{Obertura_compuerta_ (m)}{Altura_compuerta_ (m)} \quad [6]$$

En cambio, el algoritmo GoRoSo (figura 7) no modifica la trayectoria de compuerta durante el ciclo de riego, debido a que la demanda prevista es constante y el algoritmo desconoce que hemos introducido una perturbación en el canal y el nivel del agua está disminuyendo en el punto de control. El calado en el punto de control disminuye hasta 1,1 m., por lo que el caudal extraído por el orificio lateral será de 3 m³/s (Figura 8). En ese sentido, el caudal total extraído continuará siendo de 5 m³/s, ya que 3 m³/s se extraen por el orificio lateral y 2 m³/s se extraen a partir del grupo motobomba. Como podemos ver en las figuras 7 y 8, una diferencia en la posición de la compuerta de 0,06 representa proporcionalmente un incremento del caudal en 2 m³/s en el canal.

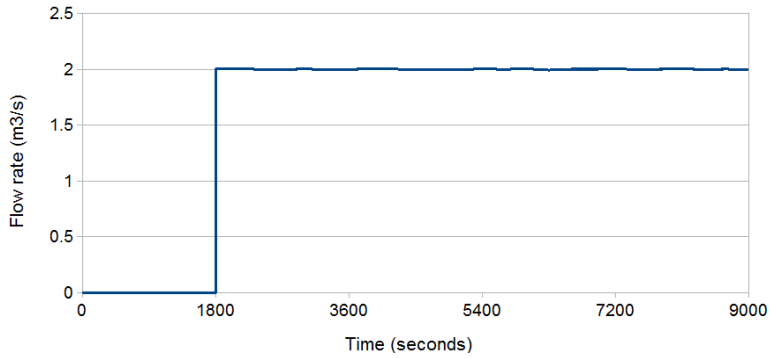


Figura 6. Perturbación o demanda no programada calculada con el algoritmo

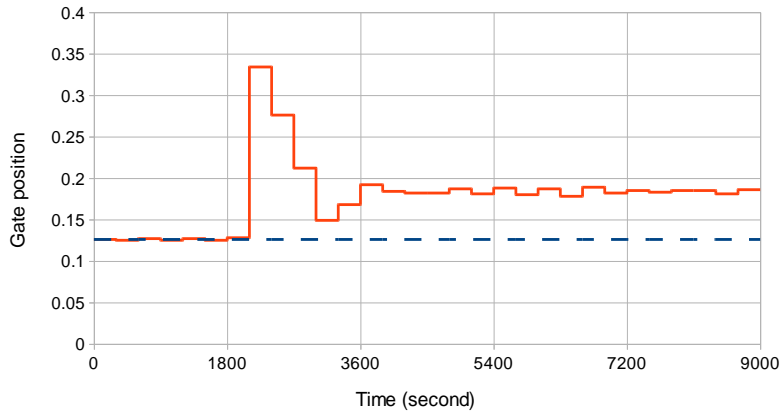


Figura 7. Trayectoria de compuerta calculada por GoRoSoBo (línea continua de color naranja) / Goroso (línea discontinua azul).

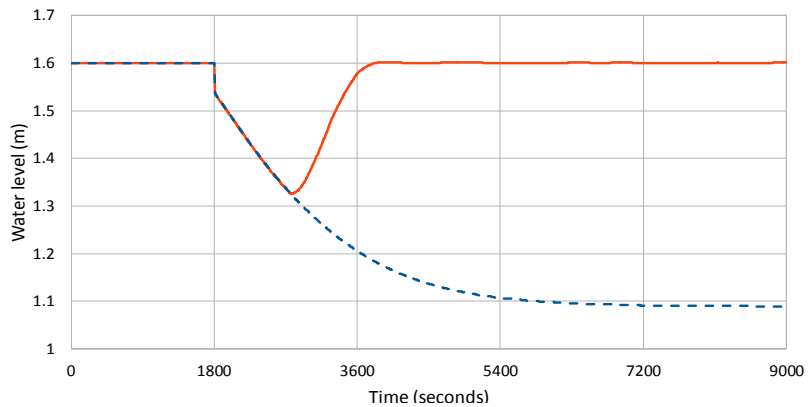


Figura 8. Trayectoria del nivel del agua en el punto de control obtenido por GoRoSoBo (línea continua de color naranja) / Goroso (línea discontinua azul).

4. Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos con GoRoSoBo podemos concluir:

- Los algoritmos CSI y GoRoSoBo obtienen excelentes resultados operando juntos, en el ejemplo realizado. Las mediciones de nivel de agua, la demanda prevista y la trayectoria de compuerta se envían a CSI, y éste calcula los caudales reales extraídos y el estado hidrodinámico del canal. A su vez, todos estos datos son enviados a GoRoSoBo que calculará la trayectoria óptima de compuerta para alcanzar el comportamiento deseado en el punto de control.
- Si necesitamos gestionar un canal en tiempo real, donde se pueden producir extracciones desconocidas, deberemos trabajar con un controlador en lazo cerrado como GoRoSoBo.
- Se ha establecido un ejemplo numérico muy sencillo para comprobar fácilmente el buen comportamiento del algoritmo. El algoritmo de control consigue mantener constante el nivel en el punto de control (1,6 m) en tan sólo veinte minutos.
- El algoritmo GoRoSoBo se ha verificado con otros ejemplos numéricos (Bonet ,2015), obteniendo muy buenos resultados.

5. Referencias

Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff T. (1997). Comparison of numerical procedures for gate stroking. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 113(2), pp.129-136.

Bonet E. (2015). Experimental design and verification of a centralized controller for irrigation canals. PhD. UPC, Technical University of Catalonia.

Chevereau, G. (1991). Contribution à l'étude de la régulation dans les systèmes hydrauliques à surface libre, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, FR.

Liu, F., Feyen, J., Berlamont, J. (1992). Computation method for regulating unsteady flow in open channels. *J. of Irrig. and Drain. Eng.*, ASCE, 118 (10), pp. 674-689.

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. PhD. UPC, Technical University of Catalonia.

Soler J., Bonet E., Gómez M. (2013). Algoritmo “CSI: Canal Survey Information” para el seguimiento de los caudales extraídos en canales de regadío. III Jornadas de Ingeniería del Agua. UPV.

Wylie E.B. (1969). Control of transient free-surface flow. J. of the Hydr. Div., (ASCE), pp. 347-361.