

Aplicación del algoritmo «GoRoSo» en el cálculo del cierre de emergencia del Canal de la Margen Izquierda del Delta del Ebro en caso de llegada de una avenida contaminada

Joan Soler i Guitart

Consultor hidráulico; Profesor Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. UPC.

joan.soler@upc.edu

Manolo Gómez Valentín

Catedrático; Profesor Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental. UPC.

manuel.gomez@upc.edu

José Rodellar Benedé

Catedrático; Profesor Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Departamento de Matemática aplicada III. UPC.

jose.rodellar@upc.edu

1 Introducción y Objetivos

La red de canales que distribuye el agua procedente del río Ebro por todo el hemidelta izquierdo del Delta del Ebro se alimenta de un canal llamado Canal de Conducción —denotado por el acrónimo CC en lo sigue— que deriva agua del río en el azud de Xerta-Tivenys. Próximamente, este canal dispondrá de un sistema de cinco compuertas en línea para su cierre en caso de emergencia de algún tipo (Figura 1). Dado el carácter arborescente de la red de canales, mediante el cierre del CC se aísla completamente el sistema.

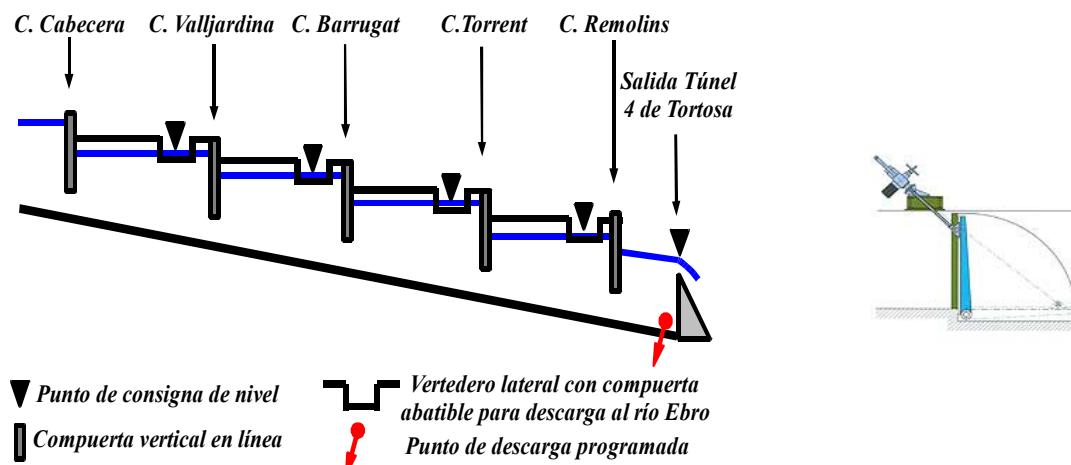


Figura 1 A mano derecha esquema representativo del Canal de Conducción. El canal de 14 Km de longitud está revestido con piezas prefabricadas que conforman una sección trapezoidal de 75° de talud, tiene una anchura de la solera variable 3 m de calado máximo y dispondrá de 5 grupos de compuertas de 3 m de recorrido máximo, un mínimo de cuatro puntos de descarga al río Ebro mediante vertederos laterales de altura regulable como la de la gráfica de mano derecha. (Fuente: <http://www.cmo.es>)

A pesar de que sería posible cerrar todas las compuertas de forma cuasi instantánea, la operación de cierre del CC no puede hacerse en tan breve período de tiempo porque el canal puede desbordarse o colapsar su revestimiento por el efecto indeseable de la subpresión debida al vaciado rápido. Para evitar en la medida de lo posible las oscilaciones de la lámina de agua que se producen durante el transitorio generado por los movimientos de compuerta y a su vez conseguir que el cierre sea lo más rápido posible, se deben de mover las compuertas de una determinada manera a lo largo del tiempo de operación; lo que se significa mover las compuertas según su trayectoria. Es decir, se trata de un sistema de control centralizado en lazo abierto.

De acuerdo con ACA (2007) y ACUAMED (2007), se dispone de unas 7,3 horas para el cierre del CC para el cierre del CC antes que una fuga de contaminante generada en el embalse de Flix llegue al azud de Xerta-Tivenys. Se ha propuesto un cierre del CC en este tiempo y dividido en tres fases. La primera de 3 horas, la segunda de 3 horas más y la tercera de las 1,3 horas restantes. Una descripción detallada de estas fases está fuera del alcance de este trabajo. Así pues, el objetivo de esta ponencia es el de describir el procedimiento de cálculo de estas trayectorias de compuerta de la Fase 2 con el algoritmo «GoRoSo» y mostrar el resultado de aplicar las trayectorias de compuerta calculadas en el modelo de simulación del Canal de Conducción.

2 El algoritmo «GoRoSo»

El algoritmo «GoRoSo» se basa básicamente en el conocimiento de la respuesta del sistema que se obtiene cuando se le aplica un determinado conjunto de trayectorias de compuerta (1), respuesta obtenida mediante el modelo de simulación del canal en estudio. Concretamente, el algoritmo calcula la discrepancia —expresada mediante el funcional «de mínimos cuadrados», cuyas variables independientes son las propias trayectorias de compuerta— entre el comportamiento simulado con una determinado conjunto de trayectorias y el comportamiento deseado (aquí se trata de cerrar el canal si mover el nivel de la lámina en determinados puntos llamados puntos de consigna de nivel). En base esta discrepancia el algoritmo rectifica las trayectorias ensayadas y vuelve a simular para volver de calcular el funcional. Por lo tanto, el algoritmo tiene una estructura recursiva.

«GoRoSo» es una herramienta de programación matemática mediante la cual se va obteniendo una sucesión de «Trayectorias de compuerta» URiter que ensayadas en el modelo matemático «Modelo predictivo» dan lugar a otra sucesión —esta vez de «Comportamiento predicho» YRiter(URiter)— que tienden cada vez más hacia el «Comportamiento deseado» Y^* , llegando al final de la sucesión a la solución llamada «Trayectoria de referencia» UR^* que es la que más hace asemejar el «Comportamiento predicho» $YR(UR^*)$ al «Comportamiento deseado» Y^* . Como algoritmo que es, «GoRoSo» tiene una estructura recursiva, es decir, aprovecha los resultados obtenidos por el modelo para reajustar en cada iteración las trayectorias ensayadas:

1. Inicio: $iter=0$ y $UR^{iter} = U_0$.
2. Cálculo del «Comportamiento predicho»: $Y_R^{iter} = Y(UR^{iter})$.
3. Si $Y_R^{iter} \approx Y^* \rightarrow$ acaba;
4. Si no, actualiza $\sim> UR^{iter}=UR^{iter}+\Delta UR^{iter}$; $iter=iter+1$; Vuelve al paso 2.

Aquí $\Delta URiter$ representa la rectificación sobre las «Trayectorias de compuerta» hecha en cada iteración en función de los resultados obtenidos de la previsión. Una vez encontradas las «Trayectorias de referencia», ya se puede iniciar el movimiento de las compuertas según estas trayectorias calculadas con la esperanza que el canal real responda con este «Comportamiento deseado». Seguidamente, se definen todos los componentes del algoritmo de una forma más exhaustiva.

2.1 El Modelo predictivo

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 más precisas serán las «Trayectorias de referencia» resultantes. Dicho de otro modo, si el modelo fuera perfecto, al implementar en el canal las «Trayectorias de referencia», el comportamiento del canal sería exactamente igual «Comportamiento predicho» y por lo tanto lo más parecido al «Comportamiento deseado». En este trabajo se ha utilizado el modelo completo de Saint-Venant como «Modelo predictivo» que es considerado como el mejor 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

¹ Se entiende por trayectoria de compuerta como aquella secuencia de posiciones de compuerta a lo largo del tiempo.

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 da el siguiente sistema ordinario de cuatro ecuaciones (Figura 2):

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

donde y es el calado, v es la velocidad media, 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 y $T(y)$ es el ancho superior de la superficie libre, todas de una sección del canal.

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^-) (Figura 2) donde se resuelve el sistema (1).

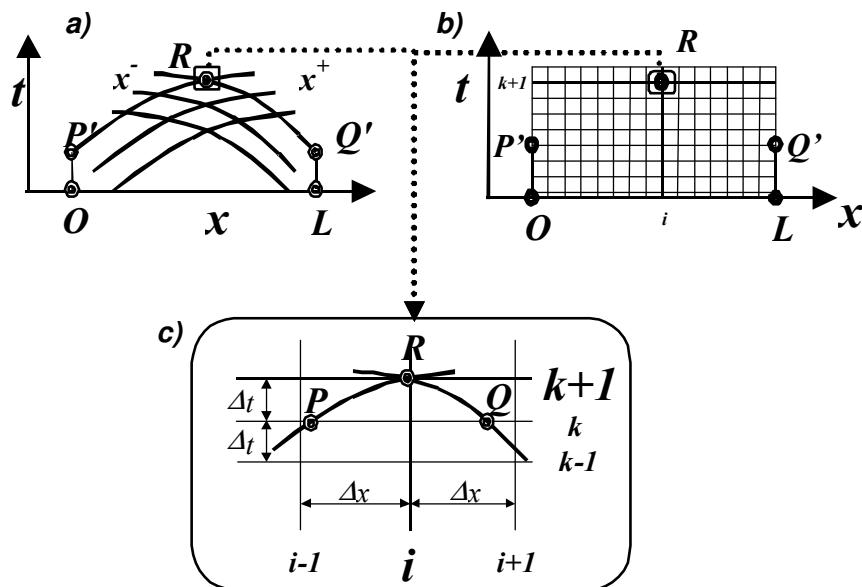


Figura 2 Esquema de las características y discretización. Se tiene en a) la malla de curvas características, en b) la malla de discretización y en c) la superposición de ambas

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 $O-L-Q'-R'-P'-O$ y de las ecuaciones, por ejemplo, mediante un esquema en diferencias finitas centrales de segundo orden llamado de características curvas en Gómez (1998):

$$\left. \begin{array}{l} (v_R - v_P) + \frac{g}{2} \left[\frac{1}{c(y_R)} + \frac{1}{c(y_P)} \right] (y_R - y_P) = g \left\{ S_0 - \frac{1}{2} [S_f(y_R, v_R) + S_f(y_P, v_R)] \right\} (t_R - t_P) \\ x_R - x_P = \frac{1}{2} \{ [v_R + c(y_R)] + [v_P + c(y_R)] \} (t_R - t_P) \\ (v_R - v_Q) - \frac{g}{2} \left[\frac{1}{c(y_R)} + \frac{1}{c(y_Q)} \right] (y_R - y_Q) = g \left\{ S_0 - \frac{1}{2} [S_f(y_R, v_R) + S_f(y_Q, v_Q)] \right\} (t_R - t_Q) \\ x_R - x_Q = \frac{1}{2} \{ [v_R - c(y_R)] + [v_Q - c(y_Q)] \} (t_R - t_Q) \end{array} \right\} \quad (2)$$

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 .

2.1.1 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 lateral, una extracción por bombeo programado y una compuerta de guillotina. Así que, imaginemos que en el punto i de la Figura 2 hay una almenara como la de la Figura 3. Entonces, en este punto, se tienen que verificar las dos ecuaciones siguientes:

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

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

donde C_d es el coeficiente de desagüe de la compuerta, a_s 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 , $q_b(k)$ 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:

$$q_s = C_s l_s \sqrt{2g[y_e(k) - y_0]^3} \quad (4)$$

donde C_s es el coeficiente de desagüe 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 2.1 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

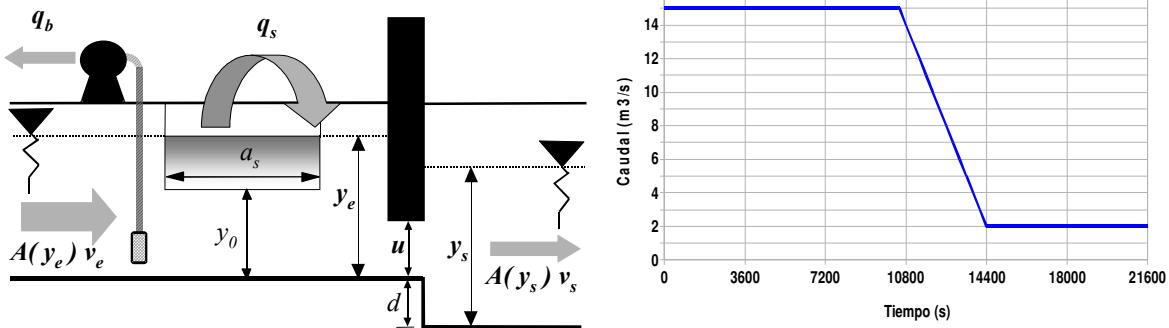


Figura 3 A mano izquierda, almenara con una compuerta, un bombeo y un vertedero. A mano derecha el hidrograma de caudal de descarga programada para la definición de la condición de contorno del extremo de aguas abajo. Nótese que el hidrograma de extracción programado pasa de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en tan solo una hora

2.1.2 Ecuaciones de un cambio de sección

Los cambios de sección o de cambio de pendiente se modela como una transición:

$$A[y_e(k)]v_e(k) = A[y_s(k)]v_s(k) + q_b + q_s \quad (5-a)$$

$$y_e(k) + \frac{v_e^2(k)}{2g} + d = y_s + \frac{v_s^2(k)}{2g} + L_T \times \frac{S_f[y_e(k), v_e(k)] + S_f[y_s(k), v_s(k)]}{2} + c_{DC} \frac{|v_e^2(k) - v_s^2(k)|}{2g} \quad (5-b)$$

donde: c_{DC} es el coeficiente de divergencia/contracción de la transición, L_T es la longitud de la transición y S_f es la función de pérdidas de carga de Manning que vale:

$$S_f(y, v) = n^2 \times v \times |v| \times A(y)^{-\frac{4}{3}} \times P(y)^{\frac{4}{3}} \quad (6)$$

donde: n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Para la computación de un cambio de sección se resuelve el mismo sistema de una almenara pero substituyendo las ecuaciones de (3) y (4) por las de (5) y (6).

2.1.3 Condición de contorno de aguas arriba

En cabecera existen dos compuertas de 4 m de ancho que regulan el caudal de entrada del río Ebro mediante el control del nivel de aguas arriba y de aguas abajo. Por lo tanto, la condición de contorno para el extremo de aguas arriba es la de calado conocido que denominamos $H(k)$. Sabiendo que $y_e(k) = H(k)$, $q_b(k)=0$ $q_s=0$ las expresiones (3-a) a (4) se transforman en una sola expresión para la condición de contorno de aguas arriba de CC. La función de nivel $H(k)$ es el nivel de agua del río que se ha supuesto constante. Durante el cierre del canal que dura 7,3 horas esto no tiene por qué ser así. Aprovechando la capacidad de medida de los niveles de aguas arriba y de aguas abajo del controlador PID situado en cabecera y conociendo el hidrograma de caudal generado en la simulación del modelo hidráulico, esta vez considerado a modo de consigna, se puede hallar la posición instantánea de la compuerta de la siguiente manera:

$$u_1(k) = \frac{q_s(k)}{C_d \times a_c \times \sqrt{2g[H_{UPS}(k) + d - y_e(k)]}} \quad (7)$$

dónde: $H_{UPS}(k)$ e $y_e(k)$ son ahora medidos en tiempo real y $q_s(k)$ es ahora calculado mediante el modelo hidráulico.

2.1.4 Condición de contorno de aguas abajo

Para el extremo de aguas abajo —justo a la salida del Túnel 4— se ha establecido una condición de contorno tipo vertedero con una descarga programada de manera que el caudal de llegada al contorno se distribuye entre la parte descargada de valor prefijado y el resto vertido:

$$q(k) = q_b(k) + C_s l_s \sqrt{2g} [y(k) - y_0]^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

donde: $q(k)$ e $y(k)$ son el caudal y el calado en el contorno en el instante k , $q_b(k)$ es el caudal de descarga programado, C_s es el coeficiente de desagüe del vertedero que vale 0,61, l_s es el ancho del labio que vale 999,9 m para simular la salida de agua del canal cuando se produce un desbordamiento, es decir, cuando $y > y_0$ y y_0 es la altura del labio respecto de la solera del canal que vale lo mismo que la altura de la coronación 3 m.

Esta condición de contorno intenta reproducir el hecho de que cuando el hidrograma de caudal de llegada al extremo de aguas abajo —que es el resultado de las operaciones de las compuertas en línea— difiere del hidrograma de descarga programado $q_b(k)$ impuesto de la gráfica de mano derecha de la Figura 3, se produce o bien un desbordamiento o bien un secado excesivo del canal, es decir, un alejamiento del nivel del canal de la consigna. Con la regulación de las compuertas que se propone aquí, se mantiene el nivel a la consigna de 2,5 m de manera que el hidrograma de caudal de llegada es igual al hidrograma de descarga programado.

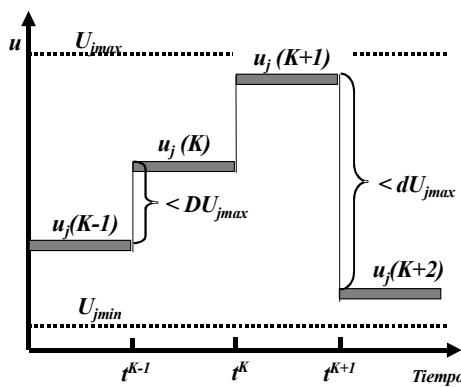


Figura 4 Representación de una trayectoria de compuerta

2.2 Trayectorias de compuerta

Las únicas estructuras de control proyectadas en el CC son las compuertas. 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 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 4. 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 $u_j(K)=u_j[t^{K-1}, t^K]$ —. Teniendo en cuenta las nc trayectorias de las respectivas compuertas y todos los parámetros genéricos, se puede compilar el vector de «Trayectorias de compuerta»:

$$U = [u_1(K_I), \dots, u_j(K_I), \dots, u_{hc}(K_I), \dots, u_1(K), \dots, u_j(K), \dots, u_{hc}(K), \dots, u_1(K_F), \dots, u_j(K_F), \dots, u_{hc}(K_F)] \quad (9)$$

donde K representa el índice temporal de tramo de trayectoria que empieza en K_I (el primer periodo del horizonte de predicción) y termina en K_F , de manera que $K_F - K_I + 1$ es el número total de intervalos de muestreo en que se han subdividido el horizonte de predicción. Como ya se ha dicho, U será la incógnita.

2.3 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 5 puede verse una discretización particular del dominio espacio-tiempo para un determinado canal de ejemplo.

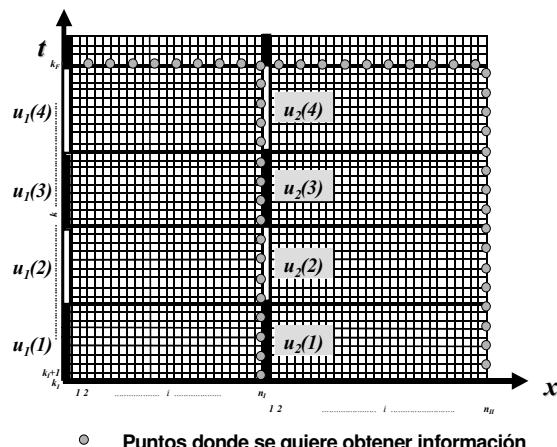


Figura 5 Ejemplo de discretización del dominio espacio tiempo x-t de un canal de dos tramos—el I y el II—con n_I y n_H nodos de discretización, respectivamente

El ejemplo de la Figura 5 corresponde a un canal con dos tramos —el I y el II— con sus correspondientes almenaras 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 períodos de muestreo, siendo 8 la dimensión de U y $K_I=1$ y $K_F=4$. Por otro lado, la discretización temporal está indexada con k minúscula y va desde $k=k_I$ hasta $k=k_F$. En este caso particular, $k_F - k_I + 1 = 37$. Finalmente, aunque sea adelantar acontecimientos, los 51 puntos grises representan los puntos donde nos va a interesar obtener los valores de caudal y de velocidad y para compilar el «Vector previsión» y el de «Comportamiento deseado». 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:

$$x(k) = [y_1(k), v_1(k), \dots, y_{n_I}(k), v_{n_I}(k), y_{n_I+1}(k), v_{n_I+1}(k), \dots, y_{n_I+n_{II}}(k), v_{n_I+n_{II}}(k)]^T \quad (10)$$

Todos estos vectores pueden ser compilados en uno solo llamado «Vector previsión»:

$$X_{k_I+1}^{k_F}(U) = [x(k_I+1)^T, x(k_I+2)^T, \dots, x(k_F-1)^T, x(k_F)^T]^T \quad (11)$$

Hay que hacer notar la dependencia del «Vector previsión» del vector de «Trayectorias de compuerta» U y también que dicho vector tiene, para el ejemplo de la Figura (5), $n_X = 2 \times 37 \times (25+28) = 3922$ 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 previsión»:

$$Y_{k_I+1}^{k_F}(U) = [C] X_{k_I+1}^{k_F}(U) \quad (12)$$

donde $Y_{k_I+1}^{k_F}(U)$ es el «Comportamiento predicho». Nótese que para el ejemplo de la Figura 5, este vector tiene 51 componentes y la matriz $[C]$ una dimensión de 51×3922 . Este vector será usado para definir la «Función objetivo».

2.4 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. En el ejemplo de la Figura 5, los puntos grises representan los puntos donde hay que establecer el «Comportamiento deseado». Estos valores se incluyen dentro del vector «Comportamiento deseado»:

$$Y^* \quad (13)$$

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 (12) (puntos grises de la Figura 5). Un encaje perfecto de hidrogramas entre el «Comportamiento predicho» y «Comportamiento deseado» raramente se puede conseguir porque es físicamente imposible. Para poder cuantificar este encaje se define la «Función objetivo»:

$$F(U) = \frac{1}{2} (Y_{k_I+1}^{k_F}(U) - Y^*)^T [Q] (Y_{k_I+1}^{k_F}(U) - Y^*) \quad (14)$$

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 que minimice (14), es la base del problema de control y U^* es la solución, es decir, las «Trayectorias de referencia».

2.5 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 4:

$$U \min_j \leq u_j(K) \leq U \max_j ; \quad j = 1, \dots, nc ; \quad K = K_I, \dots, K_F \quad (15)$$

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:

$$\begin{aligned} u_j(K) - u_j(K-1) &\leq D U \max_j ; \quad u_j(K-1) - u_j(K) \leq d U \max_j \\ j &= 1, \dots, nc ; \quad K = K_I + 1, \dots, K_F \end{aligned} \quad (16)$$

donde $D U \max_j$ es el máximo movimiento de abertura permitido en un instante k para una compuerta j y $d U \max_j$ es el máximo movimiento de cierre permitido.

2.6 El algoritmo «GoRoSo»

El algoritmo «GoRoSo» es un algoritmo que resuelve el problema de minimizar (12) sujeto a las restricciones (13) y (14) 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, de forma exhaustiva en Soler (2003), y en forma resumida en Soler et al. (2004) y Soler et al. (2008).

3 Aplicación del algoritmo «GoRoSo»

La Fase 2 de cierre del Plan de emergencia para el cierre inmediato del CMI, ha sido calculada mediante el algoritmo «GoRoSo» y en el resto de las tres fases de la que consta el cierre no interviene porque son operaciones de un solo movimiento de compuertas. Es la segunda fase, el canal pasa de un estado estacionario inicial —en el que se transporta un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ — a un estado estacionario final —en el que se conduce un caudal de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ — (Figura 6).

Como se llega a los $15 \text{ m}^3/\text{s}$ y como se pasa de los $2 \text{ m}^3/\text{s}$ a los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ es objeto de las otras dos fases. El transitorio que se produce entre ambos estados no puede hacerse con un solo movimiento de compuerta sino que deberá hacerse paulatinamente y con cierto desfase temporal entre trayectorias de las diferentes compuertas. El «Comportamiento deseado» consiste en mantener fijo el calado en determinados puntos del canal; puntos que se denominan puntos consigna de nivel. Las trayectorias resultantes son óptimas porque:

- El tiempo transcurrido entre ambos estados estacionarios resulta ser el menor posible.
- El movimiento de la lámina en los puntos de consigna de nivel es el menor posible.
- Todos los movimientos de compuerta pueden ser restringidos a cierta cantidad en función de la velocidad de los motores de las compuertas.

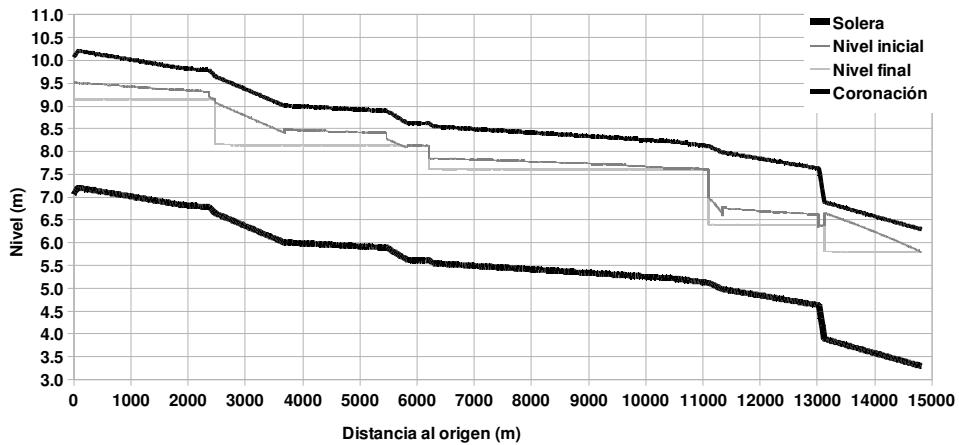


Figura 6 Curvas de remanso del CC para un estado inicial con un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ y un estado final de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. La curva de remanso inicial se corresponde con la condición inicial a implementar en el Modelo predictivo

3.1 Componentes del algoritmo «GoRoSo»

Horizonte de predicción: se establece un horizonte de predicción de 72 períodos de muestreo de *5 minutos* cada uno ($= 300 \text{ s}$), lo que significa *6 horas* de horizonte de predicción y de período de simulación ($K_F=72$, $K_I=1$).

Trayectorias de referencia: para todo el horizonte de predicción se establece para cada compuerta una trayectoria a tramos constituida por 72 posiciones de compuerta. Así, U tiene $72 \times 5 = 360$ componentes.

Comportamiento deseado: se han elegido los puntos justo aguas arriba de las compuertas como puntos de consigna de nivel y el valor de sus componentes de $2,5 \text{ m}$, que se corresponde con la cota del labio del vertedero abatible de la compuerta lateral abatible. También se considera punto de consigna el extremo de aguas abajo a la salida del Túnel 4 en Tortosa. Es decir, un total de 5 puntos de consigna. Por otro lado, también se ha incorporado como punto de nivel de consigna los *612 puntos* correspondientes al perfil longitudinal del CC con una sección cada 25 m para el instante final k_F . El nivel de consigna es variable en cada punto y se corresponde con nivel que da la curva de remanso del estado final para el caudal de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 6). Así pues, se construye el vector «Comportamiento deseado» Y^* con $(72-1) \times 5 + 612 = 967$ componentes.

Vector previsión: se establece una discretización para la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant de 25 m por celda. Esto representa *612 secciones* de discretización y una dimensión de 967 componentes.

Restricciones a las trayectorias: se establecen las siguientes restricciones a los movimientos de compuerta:

$$\begin{aligned} \text{Restricciones funcionales: } & -0,05 \leq u_i(K) - u_i(K-1) \leq 0,05 \quad \forall i = 1, \dots, 5 \\ \text{Restricciones de conjunto: } & 0,0001 \leq u_i(K) \leq 1,0 \quad \forall i = 1, \dots, 5 \end{aligned} \tag{15}$$

3.2 Resultados

El resultado final de la optimización del algoritmo «GoRoSo» puede verse en la Figura 7.

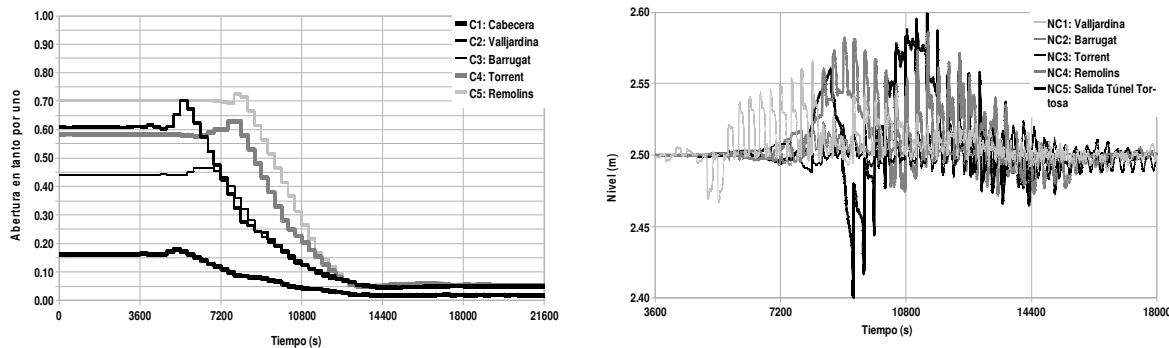


Figura 7 A mano izquierda, las cinco «Trayectorias de referencia» de seis horas. A mano derecha, hidrogramas de nivel obtenidos en los puntos de nivel de consigna y cuando se aplican al «Modelo predictivo» las «Trayectorias de referencia»

A la vista de la Figura 7 puede destacarse los siguientes puntos:

- 1.- Las trayectorias de compuerta han sido calculadas como una función temporal a tramos de 5 minutos por posición. Cada cambio de posición supone con respecto a la anterior posición un movimiento de cierre o apertura de como máximo 0,05 (que corresponde a 15 cm cuando de la apertura máxima de la compuerta que es de 3 m).
- 2.- El valor de la «Función objetivo» (14) cuando se aplican estas trayectorias de compuerta es 10^{-4} . Es decir, prácticamente cero. Esto significa que es físicamente posible cerrar con el grado de restricción a los movimientos que se ha establecido en (15). Ensayos numéricos hechos con grados de restricción mayores, no consiguen baja tanto $J(U)$. Ello nos indica que a medida que la «Función objetivo» aumenta, más difícil resulta conseguir el «Comportamiento deseado».
- 3.- El período de tiempo desde que se mueve la primera compuerta hasta que se llega a la posición final es de menos de 3 horas, mientras que el hidrograma de caudal a la salida del túnel de Tortosa dura tan solo 1 hora.
- 4.- El calado no varía prácticamente en las secciones donde se establece la consigna de nivel de 2,5 m de calado respecto de la solera del canal —curvas «NC1», «NC2», «NC3» y «NC4»—. En estos puntos es donde se ubican los vertederos laterales con la misma altura del labio a 2,5 m de la solera. Como puede intuirse, en esta fase los vertederos no tienen porqué desaguar demasiado.
- 5.- En el extremo de aguas abajo —curva «NC5»— la amplitud de la oscilación es inferior 20 cm. Es resultado puede considerarse adecuado si se tiene en cuenta que aquí es donde se establece el hidrograma de extracción.
- 6.- El grado de optimización conseguido con las trayectorias de compuerta puede visualizarse como el grado de semejanza entre los calados obtenidos con la simulación y el valor prefijado de consigna. A la vista de las curvas «NC1», «NC2», «NC3» y «NC4» puede concluirse que se cumple plenamente la consigna.

4 Conclusiones

Seguidamente se enumeran las conclusiones finales a modo de resumen.

1. Se ha construido un modelo matemático («Modelo predictivo») basado en las ecuaciones completas de Saint-Venant, el cual describe el comportamiento hidráulico del Canal de Conducción —canal que alimenta la red de canales del hemidelta izquierdo del río Ebro desde el azud de Xerta-Tivenys— y que contempla la presencia de todas las estructuras hidráulicas y todos los mecanismos de actuación proyectados para la implantación del Plan de emergencia del Canal de la Margen Izquierda.
2. En dicho plan de emergencia se contempla el cierre del Canal de Conducción en tres fases. En la segunda fase, de 3 horas de duración, se pasa de un estado estacionario del canal en que se transportan $15 \text{ m}^3/\text{s}$ a otro estado estacionario de $2 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. Para el cálculo de las trayectorias de compuerta a implementar en el Canal de Conducción en la segunda fase, se ha utilizado el algoritmo «GoRoSo» desarrollado por personal investigador del grupo FLUMEN. Dicho algoritmo utiliza los resultados del «Modelo predictivo» para la optimización de las trayectorias de compuerta. Es decir, calcula las «Trayectorias de referencia» que son las trayectorias

que implementadas en el «Modelo predictivo» dan como resultado un comportamiento hidráulico lo más semejante al «Comportamiento deseado».

4. El «Comportamiento deseado» consiste en mantener la lámina de agua a un determinado nivel en determinados puntos denominados de consigna de nivel durante todo el periodo de cierre de las compuertas. Con las «Trayectorias de referencia» se consigue este objetivo en el «Modelo predictivo» del Canal de Conducción.
5. El objetivo definido en el punto 4, se consigue con 3 horas solamente con una restricción al movimiento de las compuertas de un máximo de 15 cm. Restricciones superiores no permiten el cierre en tan breve periodo de tiempo.

5 Referencias bibliográficas

ACA (2007), «Pla d'actuació del PROCICAT: emergències per episodis de contaminació de l'Ebre aigües avall de l'Embassament de Flix», Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya, documento de trabajo de Julio.

ACUAMED (2007), «Eliminación de la contaminación química en el embalse de Flix», Proyecto constructivo, Ministerio de Medio Ambiente.

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.

Luemberger, D.G., (1984), «Linear and Nonlinear Programming», 2nd. Ed., Addison-Wesley, Massachusetts.

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.

Soler, J., Gómez, M., Rodellar, J., (2004), «Una herramienta de control de transitorios en canales de regadío», Ingeniería del agua, V.11, núm. 3, pp. 297-313, Septiembre.

Soler, J., Gómez, M., Rodellar, J., (2008), «A control tool for irrigation canals with scheduled demands», *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, pp. 152-167.

6 Agradecimientos

La elaboración del presente estudio hidráulico para el plan de emergencia a ejecutar en caso de fuga de contaminantes durante la ejecución del proyecto constructivo «Eliminación de la contaminación química en el embalse de Flix» por parte de ACUAMED, ha sido posible gracias al interés de la comunidad de regantes «Comunitat de regants del Marge Esquerre Sindicat Agrícola de l'Ebre», sin cuya ayuda este trabajo no hubiera podido ser desarrollado. Así mismo nuestro agradecimiento al personal de Eptisa por la ayuda en el trabajo de campo.