

# PROPUESTA DE OPERACIÓN MEDIANTE CONTROL PASIVO DEL CANAL XERTA-SÉNIA

**Joan Soler, Manuel Gómez**

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona  
Dpto. de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental  
Universidad Politécnica de Catalunya  
Miembros del grupo Flumen UPC  
joan.soler@upc.edu

**José Rodellar**

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona  
Dpto. de Matemática Aplicada III  
Universidad Politécnica de Catalunya

**Resumen:** Se describen las principales características del futuro Canal Xerta-Sénia, el cual destaca por tener un bombeo en cabecera como generador de transitorios dentro del canal. Se presenta el modelo matemático de simulación del flujo en lámina libre en régimen no estacionario que ha permitido proyectar las estructuras del canal necesarias para implementar el sistema de regulación denominado "control pasivo de transitorios". La propuesta de regulación tiene la particularidad de que determina algunas de las características del canal; es decir, que durante el diseño del canal se ha tenido en cuenta la forma de controlarlo. La característica constructiva más relevante que ha determinado el sistema de control ha sido la de enrasar algunas de las balsas de regulación de sector con el canal para poder dotar al canal de una mayor capacidad de laminación de perturbaciones. Se plantean tres posibles escenarios de funcionamiento del canal y se presentan las predicciones del comportamiento del canal en estos escenarios hechas por el modelo. Finalmente, se concluye que el "control pasivo de transitorios" es robusto bajo determinadas condiciones y permite la gestión del canal "a la demanda".

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Entendemos por regulación de canales el conjunto de técnicas que, aprovechando la capacidad de almacenamiento de la conducción y la disociación calado-caudal que se genera en el régimen transitorio, consigue mejorar los siguientes objetivos (Manzanares, 1983):

- Cuando el canal se alimenta con un bombeo debe poderse realizar tan solo en horas valle, en las que la energía es menos costosa, con independencia de las horas en que se va a producir la demanda.
- No despreciar ni una gota, de manera que los aliviaderos pierdan su razón de ser.
- Los transitorios deben ser amortiguados para que no llegue a provocarse sobreelevaciones de lámina que supongan un riesgo de desbordamiento.
- El canal debe permanecer lleno con independencia del caudal que esté llevando en

cada momento para prolongar lo máximo posible la vida útil del revestimiento.

- Si durante determinadas horas no existe demanda, el caudal debe seguir circulando y almacenándose donde puede ser empleado en otro instante.

Se ha diseñado el Canal Xerta-Sénia, en adelante denominado por el acrónimo CXS, con la pretensión de conseguir regular el canal según los términos citados anteriormente, mediante un sistema de control robusto y técnicamente sencillo: "el control pasivo". Este sistema puede considerarse un sistema de regulación orientado a las Comunidades de Regantes porque se trata de un sistema de control sin mecanismos de actuación hidráulicos, tales como compuertas en línea, las cuales necesitan del concurso de complejos algoritmos de cálculo, como los mostrados en Soler (2003) o en Malaterre *et al.* (1998), para determinar sus movimientos.

El CXS, es un canal proyectado para transpor-

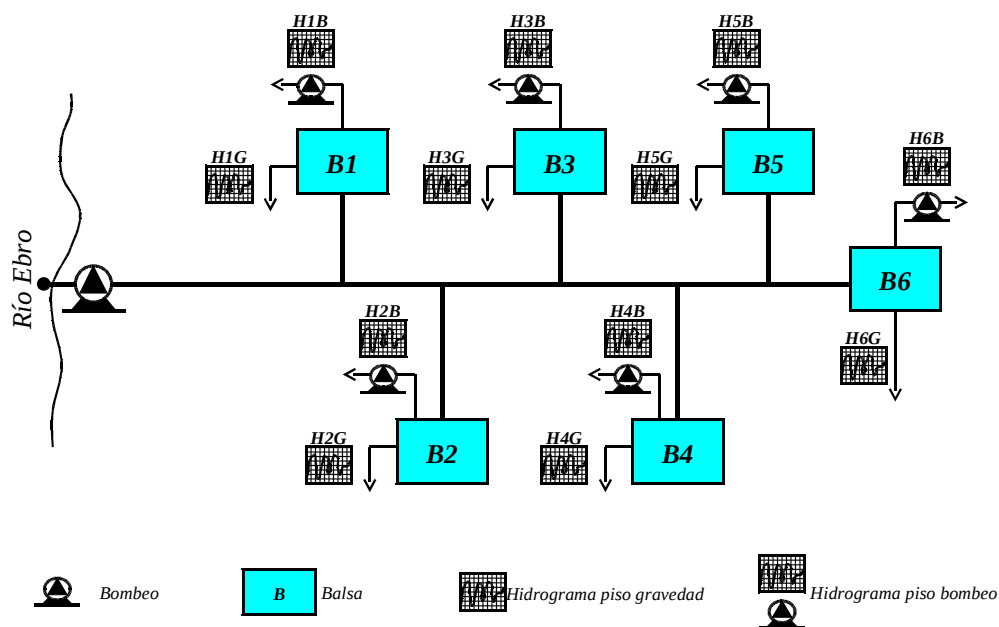
tar agua del río Ebro para la transformación en regadío de una superficie de 16.480 ha. Esta superficie pasa a incrementar 7.682 ha de parcelas altamente diseminadas por el territorio y regadas mediante pozos. Así se completa una superficie compacta de 24.151 ha repartida entre los municipios de Aldover, Amposta, Xerta, Freginals, La Galera, Godall, Mas de Barberans, Mas d'en Verge, Roquetes, Santa Bàrbara, Tortosa y Ulldecona, todos ellos en la provincia de Tarragona. La captación se produce aguas arriba del azud de Xerta-Tivenys en el río Ebro con un caudal medio en continuo en el mes de máxima demanda de 8,55 m<sup>3</sup>/s y un caudal máximo de 10 m<sup>3</sup>/s y una dotación media anual de 4.537 m<sup>3</sup>/ha. El caudal captado se eleva unos 140 m mediante un bombeo hasta la obra de entrega al canal, en forma de roseta. El proyecto ya dispone de una concesión formalizada el 2 de Mayo de 2.002.

El CXS diseñado con una sección rectangular de 2,7 m de profundidad y con un ancho de solera inicial de 4,8 m que se va reduciendo a lo largo de sus más de 32 Km de longitud. El canal distribuye el agua entre las seis balsas situadas a pie de canal -denominadas de *regulación de canal* (Figura 1)-. A su vez, estas balsas alimentan otras balsas -denominadas de *regulación de sector*- a través de los correspondientes bom-

beos y suministran por gravedad a los sectores que cuelgan directamente de las de *regulación de canal*. Todas las infraestructuras que intervienen en el Sistema<sup>1</sup> han sido dimensionadas en base a la respuesta hidráulica del canal ante escenarios generadores de fuertes perturbaciones<sup>2</sup>, tres de los cuales se presentan aquí.

La presencia del bombeo de cabecera de entrada al sistema, de los bombeos a la salida de las balsas de *regulación de canal* y de las redes de sectores alimentados por gravedad a la demanda que cuelgan de dichas balsas, hace que se prevea un flujo en el Sistema en régimen no estacionario, es decir, siempre variable. En este trabajo se presentan algunas medidas de carácter constructivo que se han tomado para el control pasivo de dichos transitorios y se muestra una forma de gestión del agua adaptada a este contexto de variabilidad temporal.

Es objetivo de este artículo exponer las líneas maestras del sistema de regulación adoptado y describir las medidas de carácter constructivo que han sido tomadas para poder llevarlo a cabo. También es objetivo de este trabajo presentar el modelo matemático implementado y los resultados que ha proporcionado puesto que ha sido la herramienta principal de ayuda a la toma de decisiones.



**Figura 1.** Esquema en planta del proyecto del Canal Xerta-Sénia donde se muestran las seis balsas de regulación de canal que se alimentan por gravedad desde el canal y también el bombeo de cabecera. De cada balsa de regulación de canal parten sendos sectores de gravedad y de bombeo con ciertas previsiones de consumo representadas como hidrogramas de caudal de extracción. Para más detalles puede consultarse el lugar web <http://www.regadius.cat>

<sup>1</sup>Aquí, denominamos Sistema al conjunto de infraestructuras constituido por el bombeo, el canal y las balsas que se alimentan directamente del canal (balsas de regulación de canal).

<sup>2</sup>Se entiende por perturbación cualquier acción sobre el flujo que produce un transitorio en el canal.

## SOLUCIÓN ADOPTADA

La alternativa de regulación adoptada somete al canal a un hidrograma de caudal de entrada altamente variable en el tiempo, durante el cual, se bombean  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  durante 18 h al día. En las 6 h restantes no se bombea. Por lo tanto, existen dos operaciones diarias que generan los correspondientes transitorios en el canal: una operación de abertura para pasar de  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  y otra de cerrado para pasar de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Si además se tiene en cuenta que el canal tiene más de 30 Km, se llega a la conclusión que el régimen estacionario es la excepción y no la regla: cada operación genera un transitorio que viaja desde aguas arriba hacia aguas abajo a una velocidad tal que cuando se lleva a cabo una de estas operaciones todavía no se ha completado el efecto de la anterior sobre el último tramo. Así, el canal siempre se encuentra en régimen variable (no estacionario).

En términos generales, la solución adoptada se basa en lo que podría denominarse “principio de laminación”. Este principio dice que a mayor capacidad de almacenamiento de un sistema, menor es el efecto producido por la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida del *Sistema*. Es decir, a mayor capacidad de almacenamiento, se amortiguan mejor las oscilaciones de nivel y caudal generadas por perturbaciones introducidas, en este caso un hidrograma de caudal de entrada por la cabecera del canal y seis hidrogramas de salida, uno por cada balsa. Este principio es el que también justifica la construcción de embalses de regulación en los ríos para la reducción de las avenidas y de los depósitos de recogida de pluviales de las redes de drenaje.

La primera consecuencia de carácter constructivo que se ha tomado es la de incrementar la capacidad de transporte del primer tramo para hacer frente al aumento de caudal de bombeo respecto del caudal medio, cosa que debe ser así por la “pérdida” de 6 h de bombeo. Es decir, para pasar de  $8,214 \text{ m}^3/\text{s}$  -caudal correspondiente a un bombeo de 168 horas ( $= 7 \times 24$ ) semanales- a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  -caudal correspondiente a un bombeo de 138 horas ( $= 5 \times 18 + 2 \times 24$ ) semanales-.

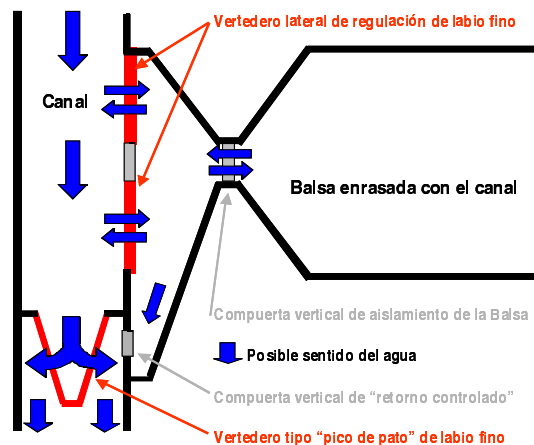
Las balsas que se alimentan directamente del canal -llamadas aquí balsas de *regulación de canal*- alimentan a su vez otras balsas de cota superior -llamadas aquí de regulación de sector- mediante el correspondiente bombeo y también suministran agua a los sectores de riego por gravedad que cuelgan directamente de ellas. Por

otra parte, el criterio general de diseño de redes de distribución por gravedad fija en 88 h a la semana el tiempo de suministro a la red -lo que corresponde a  $12,43 \text{ h/día}$ -. De esta forma, el caudal resultante de salida de las balsas de regulación de canal por gravedad será superior al de entrada desde el canal, el cual corresponde al del bombeo de cabecera. En consecuencia, en los días entre semana, al Sistema entra menos agua destinada a los sectores de gravedad de la que sale y viceversa durante el de fin de semana.

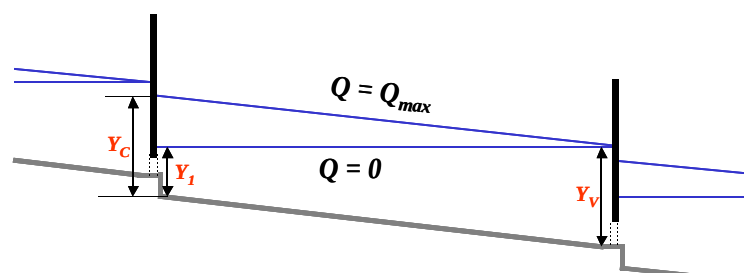
La segunda consecuencia de carácter constructivo que lleva la adopción de este sistema de regulación (que fija una entrada de agua muy variable al *Sistema*) en combinación con el criterio de diseño de las redes de distribución por gravedad que se ha expuesto en el párrafo anterior (que fija parte de la salida de agua del *Sistema*) es el incremento de volumen de las balsas de regulación de canal. Este volumen suplementario es denominado aquí como *Volumen por Desajustes Semanales (VDS)*. El VDS es necesario en todas las balsas que tienen un balance diario no nulo entre las entradas y las salidas y diferente en función del día de la semana.

La tercera decisión de carácter constructivo va encaminada a obtener la máxima capacidad de almacenamiento en línea posible: enrasar las balsas de *regulación de canal* con el propio canal, de manera que el agua pueda ir indistintamente del canal a la balsa y viceversa, en función del gradiente hidráulico existente en cada momento (Figuras 2 y 5). La gracia del “enrasado” radica en el hecho de que se consigue aumentar la capacidad global del *Sistema* para laminar perturbaciones sin tener que aumentar la capacidad de las balsas y con ello, su presupuesto. Esto es así porque las balsas solamente se cambian de posición.

Como alternativa a enrasar las balsas existe la posibilidad de construcción de una balsa ex profeso de recogida de aguas del bombeo de  $425.000 \text{ m}^3$  y situada en cabecera del canal, de manera que el canal sea alimentado desde esta balsa a un caudal constante a  $8,214 \text{ m}^3/\text{s}$ . La presencia de esta hipotética balsa no excluiría la construcción de las balsas de *regulación de canal*. Esta alternativa ha sido descartada por ser excesivamente cara porque la única función que se le puede atribuir es la de laminación del hidrograma de cabecera; en contraposición, el enrase de la balsas de *regulación de canal*, supone dar una segunda función a la capacidad de almacenamiento ya existente.



**Figura 2.** Esquema en planta representativo de almenara o punto de control con todas sus estructuras. El vertedero lateral de regulación de labio fino permite el paso de agua del canal a la balsa y viceversa y protege al canal del vaciado excesivo. La compuertas "de retorno controlado", que están situadas aguas abajo del vertedero tipo "pico de pato", posibilitan el retorno de agua hacia el canal



**Figura 3.** Esquema representativo de la lámina en un tramo de canal. En este esquema pueden verse dos posiciones de la lámina, que corresponde a caudal nulo y caudal máximo.  $Y_V$  es el nivel mínimo de 2,05 m en el punto de control debido a la presencia del vertedero tipo "pico de pato". El volumen comprendido entre las dos posiciones de la lámina se denomina cuña de almacenamiento del tramo

La cuarta decisión de carácter constructivo que se ha tomado ha sido la de implementar vertederos de gran capacidad de desagüe situados en línea en el canal, de tipo "pico de pato", cada cierta distancia. Con ello se consigue mantener el canal con cierto grosor de lámina de manera que siempre se asegura una celeridad mínima. Es bien conocido que a mayor celeridad de onda menor es el tiempo que dura un transitorio generado por una perturbación -como la generada por la abertura o cierre del bombeo- y que la celeridad de una onda viajando en un medio en movimiento, como el agua en un canal, aumenta a medida que aumenta la profundidad del agua. Con la distribución de vertederos en línea propuesta a lo largo del canal, una perturbación generada en cabecera del canal empieza a modificar las condiciones de flujo en el último tramo (a 30 Km aguas abajo de cabecera) al cabo de 2 h. Pues bien, esta decisión de tipo constructivo

va encaminada a acortar los transitorios.

La quinta decisión de carácter constructivo consiste en ubicar las conexiones laterales con las balsas enrasadas justo aguas arriba de los vertederos tipo "pico de pato" (Figura 2). La variación del nivel de la lámina de agua producido por el cambio de caudal circulante es menor a medida que uno se acerca al vertedero en línea tipo "pico de pato" (Figura 3). Precisamente, en este punto es donde se ubica el eje de rotación de la lámina de agua cuando se pasa de caudal nulo, con la lámina de agua en posición horizontal, a caudal máximo, con la lámina aproximadamente paralela a la solera del canal.

La conexión en lámina libre entre el canal y la balsa se hace a través del vertedero lateral de regulación de labio fino para mantener el canal protegido de una interferencia excesiva de las balsas, y evitar, por ejemplo, que se vacíe el tramo de canal cuando la balsa también se vacía.

De esta manera, todo el caudal derivado hacia la balsa enrasada pasa por este vertedero.

En la Figura 2 puede verse un esquema representativo de un *punto de control* o almenara de regulación<sup>3</sup>. Como muestra la Figura, existen dos vertederos: un primer vertedero tipo “pico de pato” situado en línea dentro del canal y un segundo vertedero lateral que comunica la balsa con el canal. El punto clave de este sistema se encuentra en el hecho que tanto el vertedero tipo “pico de pato” como el vertedero lateral tienen sus labios situados exactamente a la misma cota, a 2,05m sobre la solera del canal. En consecuencia (véase también Figura 5):

1. El nivel del canal nunca podrá bajar de 2,05 m de manera que puede considerarse el nivel mínimo en este punto. Esto implica que el flujo siempre tendrá la mejor celeridad posible a la hora de transportar perturbaciones, con independencia del caudal que se esté transportando en cada momento.
2. Cuando, a causa del consumo, el nivel de la balsa baje por debajo de los 2,05 m, el nivel del canal y el de la balsa estarán desacoplados y el vertedero lateral actuará no sumergido, es decir, a su máxima capacidad de desagüe. Este comportamiento es el adecuado ya que cuando la balsa está parcialmente vacía dispone de mayor capacidad de laminación y mayor caudal puede admitir.
3. Contrariamente a lo que pasa en el punto anterior, el nivel del canal se mantendrá acoplado con el de la balsa cuando este último sea igual o superior a los 2,05 m. En este caso, el nivel de la balsa y el del canal se moverán solidariamente y el vertedero lateral se mantendrá inundado con poca capacidad de desagüe. Por lo tanto, el flujo de agua a través del vertedero lateral será nulo o muy bajo, pero en cualquier caso dependiente del gradiente hidráulico. Este comportamiento también es el adecuado porque cuando la balsa está llena se frena la entrada de agua de forma automática y ya no se dispone de capacidad de laminación. Cuando el nivel del canal empieza a descender la balsa devolverá parte del agua almacenada al canal. De esta manera, se incorpora cierta capacidad de control a la demanda desde aguas

abajo porque fuera cual fuese el consumo diario extraído de la balsa, el volumen diario suministrado por el canal sería exactamente el extraído por el sector que cuelga de la balsa en el mismo período.

4. Un vez laminado el hidrograma generado por el bombeo, si se desea se puede vaciar la parte superior de la balsa -la que corresponde al recorrido superior de 2,05 m de espesor- y devolver cierto volumen al canal para redistribuirlo entre las balsas enrasadas de aguas abajo. Esto se puede llevar a cabo mediante el juego de compuertas “del retorno controlado”. Vaciar las balsas de más aguas arriba para llenar las de más aguas abajo durante el periodo sin bombeo es especialmente interesante porque con el vaciado de la balsa se gana capacidad de laminación para el siguiente ciclo de bombeo.

La “captura” de agua del canal para la alimentación de las balsas del *Sistema* en los puntos de control es un elemento clave de la regulación y por lo tanto tiene que ser “suficientemente fluida” -entendiendo por fluida el hecho de que teniendo poco gradiente hidráulico entre balsa y canal se produzca el máximo caudal posible-. Por este motivo, la conexión entre canal y balsa ha tenido que ser forzosamente en lámina libre y con la menor presencia de mecanismos que generen pérdidas de carga adicionales, puesto que el gradiente hidráulico resulta extremadamente pequeño.

Por otro lado, analizada la información sobre los consumos de agua previstos para cada sector integrados en las balsas de *regulación de canal*, se ha podido comprobar que más del 50 % del agua de todo el sistema es consumido desde las balsas B5 y B6, situadas al extremo aguas abajo del *Sistema*. Este hecho hace perder parte de la “telescopicidad” que un canal de estas características podría tener, porque se produce poca distribución de agua en los primeros *puntos de control*. Dicho en otras palabras, el canal podría ir reduciendo su sección más rápidamente si hubiera habido otra consigna de distribución del agua. Si además se tiene en cuenta que existe la posibilidad de ubicar el VDS en cualquier punto del *Sistema*, entonces el mejor lugar para ubicar todo este volumen suplementario es en el embalse de cola -en la balsa B6-. Esto debe ser así porque en el sistema de regulación propues-

<sup>3</sup>Se entiende por punto de control aquel lugar del canal donde coincide la toma de agua, la balsa enrasada, un vertedero tipo pico de pato y un vertedero lateral de regulación.

to se distribuye el agua entre las cinco primeras balsas hasta que éstas se llenan, y esto pasa en cada ciclo de bombeo. De esta forma, ninguna de las balsas sufre ningún “desajuste semanal” y la única balsa que lo acumula es la balsa B6. Y ésta es la sexta decisión de carácter constructivo que atañe a este sistema de regulación.

Pues bien, una vez descrita la configuración de los *puntos de control* ya se está en disposición de hacer la propuesta de regulación:

*“Solamente hace falta bombear en las horas de menor coste eléctrico a un caudal que esté de acuerdo con el volumen disponible del Sistema vaciado en el ciclo anterior. Por lo tanto se trata de un sistema de distribución en lámina libre y totalmente a la demanda”.*

El resto de tareas -como son la laminación de los hidrogramas, el control de los transitorios, el transporte y la distribución del agua entre las balsas, el control de niveles, etcétera- ya las hace de forma hidráulica el propio *Sistema* de una manera automática y robusta sin la intervención de nadie.

Desde un punto de vista local, se puede visualizar el funcionamiento del *punto de control* mediante cuatro etapas que se reproducen en cada ciclo de bombeo en instantes diferentes para cada punto de control:

1. Partiendo de un estado inicial en que el nivel de la balsa es menor o igual que el que marca el vertedero “pico de pato” (Niveles 2, 3 y 4 de la Figura 5), se inicia la entrada de agua con un gran caudal porque el vertedero lateral de regulación funciona libre, no inundado, a su máxima capacidad de desagüe. Esta primera etapa puede llamarse de *llenado rápido* y se pasa del estado estacionario de caudal nulo, en que la lámina se encuentra en posición completamente horizontal (Figura 3), al estado estacionario de máximo caudal en que la lámina se encuentra paralela a la solera del canal.
2. La entrada continua con un caudal cada vez más pequeño hasta hacerse igual al caudal de extracción de las balsas de *regulación de canal* por consumo directo, etapa que podría llamarse de *balance neutro*

y en la que la balsa llega al Nivel 1 de la Figura 5.

3. El ciclo de bombeo se acaba con un caudal de retorno automático al canal procedente del vaciado de la balsa desde el Nivel 1 al Nivel 2. Es la etapa en que se ha dejado de bombear desde cabecera. Se podría llamar etapa de *vaciado rápido* y se pasa del estado estacionario de caudal máximo en que la lámina libre se encuentra paralela a la solera a su nivel máximo (Figura 3), al estado estacionario de caudal nulo en que la lámina se encuentra en posición completamente horizontal.
4. Y si se desea, en este último estado, se pueden abrir las compuertas “de retorno controlado” para redistribuir durante las 6 horas que faltan hasta el inicio del siguiente ciclo de bombeo. Esta etapa puede llamarse de *redistribución*.

Finalmente, cabe destacar que el control y medida del caudal consumido deberá hacerse en las conducciones de detracción de agua de las balsas de *regulación de canal* mediante los correspondientes caudalímetros y medidores de nivel de las balsas. En otras palabras, el control del consumo de cada sector lo deberá realizar quien controle el propio *Sistema* y no independientemente cada comunidad de sector como tradicionalmente se hace. Este sistema de control puede ser perfectamente implementado en una zona de nuevos regadíos en que no hay costumbres adquiridas.

---

## MODELO MATEMÁTICO DEL CANAL

---

Un modelo matemático de simulación es una herramienta capaz de describir el comportamiento físico de un fenómeno de manera suficientemente exacta. En el caso del presente trabajo el fenómeno es el del flujo en lámina libre en canales prismáticos. Por suerte, hace muchos años que se conocen las ecuaciones de Saint-Venant<sup>4</sup> y han sido contrastadas de manera sobrada con experiencias de campo. De esta manera, una vez identificados los parámetros empíricos que necesita el modelo, su exactitud puede llegar a ser de pocos centímetros en este tipo de canales, lo que resulta suficiente para los propósitos de este estudio.

<sup>4</sup>Estas ecuaciones constituyen un sistema de dos ecuaciones en derivadas parciales de primer orden. Se trata de un sistema hiperbólico cuasi-lineal y es el resultado de aplicar los principios de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento a un volumen de control. Este sistema no tiene solución analítica conocida y por lo tanto se tiene que utilizar métodos numéricos para ser resuelto. Uno de los métodos más utilizados por su eficacia, exactitud y estabilidad es el esquema de Preissmann.

Para la construcción del modelo matemático de simulación, se ha elegido la versión 3.1.3 del HEC-RAS (Hydrological Engineering Center River Analysis System) que utiliza el esquema numérico de Preissmann (Barkau, 1992) (Figura 4). Las razones de haber elegido este software son:

1. Se trata de un software contrastado desde hace años puesto que ha sido utilizado a nivel mundial en estudios en lámina libre.
2. Puede reproducir de manera fiel el comportamiento del flujo a través de todas las estructuras singulares presentes en el proyecto del CXS.
3. Tiene un entorno agradable y fácil de tratar de manera que permite visualizar el fenómeno de los transitorios a personas no bregadas en temas de hidráulica.
4. Es gratuito, con lo cual cualquier persona o institución puede utilizar el modelo.
5. Es perfectamente adaptable a otras plataformas ya que se puede acceder fácilmente a todos los datos numéricos de entrada y salida.

Puesto que se tiene que utilizar un método numérico para resolver el sistema de Saint-Venant, hace falta indicar otros parámetros del modelo empleados:

- Se ha realizado una discretización espacial de una sección cada 20 m.
- La presencia de vertederos que funcionan inundados con un gradiente hidráulico disponible muy pequeño, obliga a resolver las ecuaciones a intervalos de tiempo muy estrechos para "capturar" en cada momento el sentido del flujo.
- El período de tiempo total de simulación del escenario estudiado ha sido de 8 días período que corresponde a un ciclo semanal más un día para comprobar que el sistema vuelva al estado inicial.
- La consecuencia inmediata de los puntos anteriores es que cada simulación con su postproceso, en un ordenador tipo Mobile

AMD Athlon (tm) XP 2400+ 350 Mhz con 448 MB de memoria RAM, cuesta unos 100 minutos de CPU.

- La salida numérica de todos los resultados que se presentan en este documento ha sido la más densa que el software permite: 1 minuto.
- Si la discretización temporal es muy corta no tiene sentido definir las condiciones de contorno a intervalos de una hora, así que se han definido los hidrogramas con un valor cada 2 minutos, que es el mínimo intervalo que permite el software.

## Geometría

### Secciones tipo

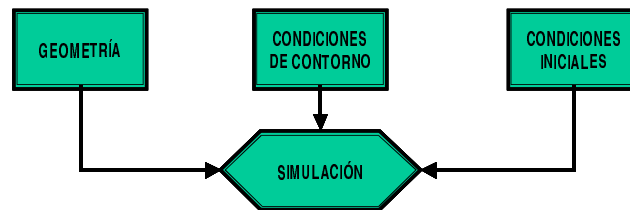
El CXS está constituido por seis tramos de canal de sección rectangular -con una altura de los hastiales que varía de 2,86 m a 2,7 m y una anchura inicial de 4,8 m con carácter telescópico<sup>5</sup>- y al final de cada tramo, se ubica una almenara y una balsa lateral con la doble función de regulación de canal y de regulación de sector. A lo largo de la traza existen unos acueductos ya construidos y pertenecientes a un antiguo canal existente que han sido aprovechados en el nuevo proyecto.

### Almenaras

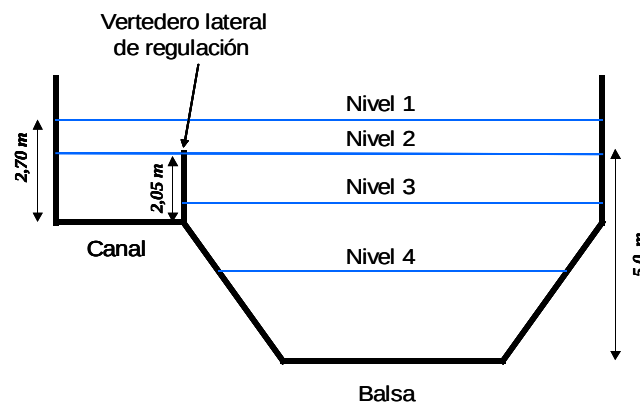
Una almenara o punto de control está constituido por un conjunto de tres estructuras de regulación (véase Figuras 2 y 5): un *vertedero de regulación en línea* -tipo "pico de pato" cuya longitud es decreciente desde los 44 m de longitud del primer vertedero a los 25 m del último-, un *vertedero lateral de regulación* -para la descarga hacia la balsas laterales de regulación de 25 m de longitud- y una *compuerta vertical* de retorno controlado -tipo guillotina de 1,5 m de anchura para devolver el agua al canal de forma controlada-. A parte de la almenaras, también se implementan unos *vertederos laterales de seguridad* cada cierta distancia.

El dimensionamiento de estas estructuras de control es el resultado de un proceso de optimización basado en multitud de ensayos numéricos de simulación mediante el modelo matemático del canal.

<sup>5</sup>Para una descripción más detallada, consúltase el lugar web: "<http://www.regadius.cat>"



**Figura 4.** Esquema representativo de los diferentes grupos de información necesarios para la construcción de un modelo de simulación del flujo en canales en lámina libre



**Figura 5.** Esquema representativo de un corte transversal en un punto de control o almenara junto con la “balsa de regulación de canal”

### Balsas

Para evitar tener que tirar agua, bajo determinadas circunstancias, tanto en funcionamiento normal como en funcionamiento de emergencia, se propone que la conexión entre el canal y la balsa se haga mediante el vertedero lateral de regulación (Figura 5). Ello da lugar a cuatro niveles de funcionamiento de la almenara: uno con bombeo, con los niveles de la balsa y el canal acoplados (*Nivel 1*), uno sin bombeo, con niveles acoplados entre balsa y el canal (*Nivel 2*) y los otros dos con bombeo pero con los niveles desacoplados (*Niveles 3 y 4*). El *Nivel 3* corresponde a un nivel por debajo del cual el agua ya no puede retornar al canal, por lo que el espacio situado entre el *Nivel 1* y el *3* se llama recorrido de la balsa.

El volumen de las cuñas de almacenamiento (Figura 3) y el de la balsa comprendido entre el *Nivel 1* y el *2* (Figura 5) es el volumen de que se dispone siempre para la atenuación de posibles “avenidas” provocadas por cualquier error en la regulación del canal. Y cuando una “avenida” de este tipo ha pasado, parte del agua de la balsa es devuelta al canal de una manera “suave”. Un consumo de las balsas y la posible redistribución

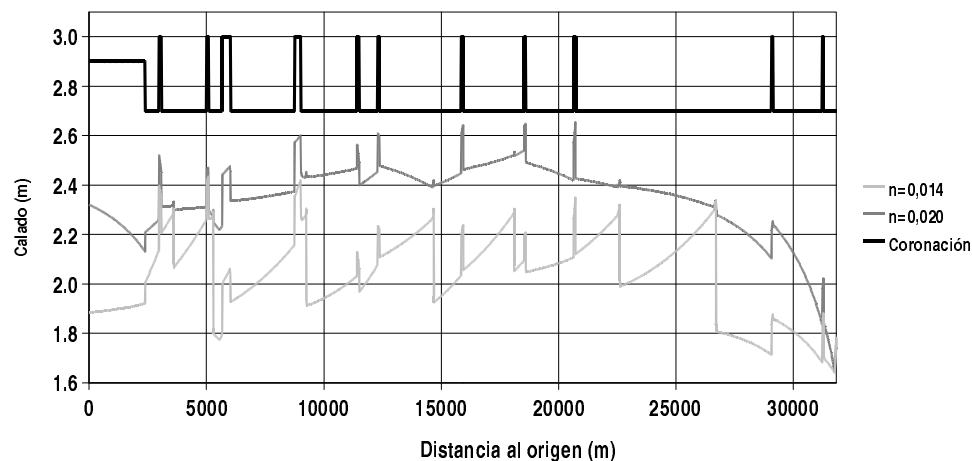
de agua desde las balsas de aguas arriba a las de aguas abajo incrementa este volumen de laminación. Como ya se ha dicho anteriormente, cuando el nivel de la balsa sea inferior al nivel del vertedero tipo “pico de pato”, que es el mismo que el del vertedero lateral (*Nivel 3* o *4* de la Figura 5), éste trabajará a su máxima capacidad de desagüe no inundado y con los niveles desacoplados.

Puesto que en el momento de la realización de este trabajo no están proyectadas las balsas de regulación y solamente se conocen los puntos de derivación del canal, no se pueden modelar de una manera precisa. Lo que sí que está definido es el calado máximo de  $H = 5$  m, el talud interior de  $m = 3$  y el volumen requerido (Tabla 1).

Para el modelo, se considera la forma de tronco de cono de base cuadrangular como la forma geométrica preferente. Para evitar los posibles defectos de volumen causados por el diseño de una balsa de forma diferente, ya se ha introducido en los valores del volumen de la balsa de la Tabla 1 un incremento de volumen del 10 % respecto de las necesidades, lo que se denomina factor de forma.

|                                  | Balsa 1 | Balsa 2 | Balsa 3 | Balsa 4 | Balsa 5 | Balsa 6 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Volumen (m <sup>3</sup> )        | 109.506 | 127.989 | 148.792 | 147.438 | 218.114 | 429.866 |
| L <sub>1</sub> (m)               | 132     | 144     | 157     | 156     | 193     | 278     |
| L <sub>2</sub> (m)               | 162     | 174     | 187     | 186     | 223     | 308     |
| S <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> ) | 17.484  | 20.819  | 24.603  | 24.356  | 37.373  | 77.188  |
| S <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> ) | 26.318  | 30.376  | 34.914  | 34.619  | 49.872  | 94.758  |

**Tabla 1.** Estimación de la superficie en planta ocupada por las balsas de regulación de canal en función de su volumen y su forma cuadrangular



**Figura 6.** Envoltentes de calados máximos obtenidos durante una simulación de todos los transitorios que se producen durante 8 días con dos valores extremos del coeficiente de rugosidad de Manning. También se muestra la máxima profundidad que tiene el canal en cada punto mediante la curva de coronación. Los “picos” de esta curva muestran el aumento de profundidad de los hastiales que hay en los acueductos

Es bien sabido que el incremento de la capacidad de almacenamiento en función del nivel del embalse es superior cuando se encuentra en la parte superior del recorrido, es decir, cuando el embalse está prácticamente lleno. Este hecho tiene mucha importancia en el caso que nos ocupa porque es precisamente cuando las balsas están llenas cuando interaccionan más con el canal. Por este motivo, la definición de las balsas para el modelo se tiene que hacer en función de la superficie proyección en planta dependiente del nivel.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se puede demostrar que las longitudes de los costados de las secciones inferior y superior de un tronco de cono de sección cuadrangular están determinadas de forma unívoca mediante las expresiones de la ec.(1)

$$S_1 = L_1 \times L_1 \quad ; \quad S_2 = L_2 \times L_2$$

$$L_1 = \sqrt{\frac{V - m^2 H^3}{H}} - mH \quad ; \quad L_2 = L_1 + 2 \times mH \quad (1)$$

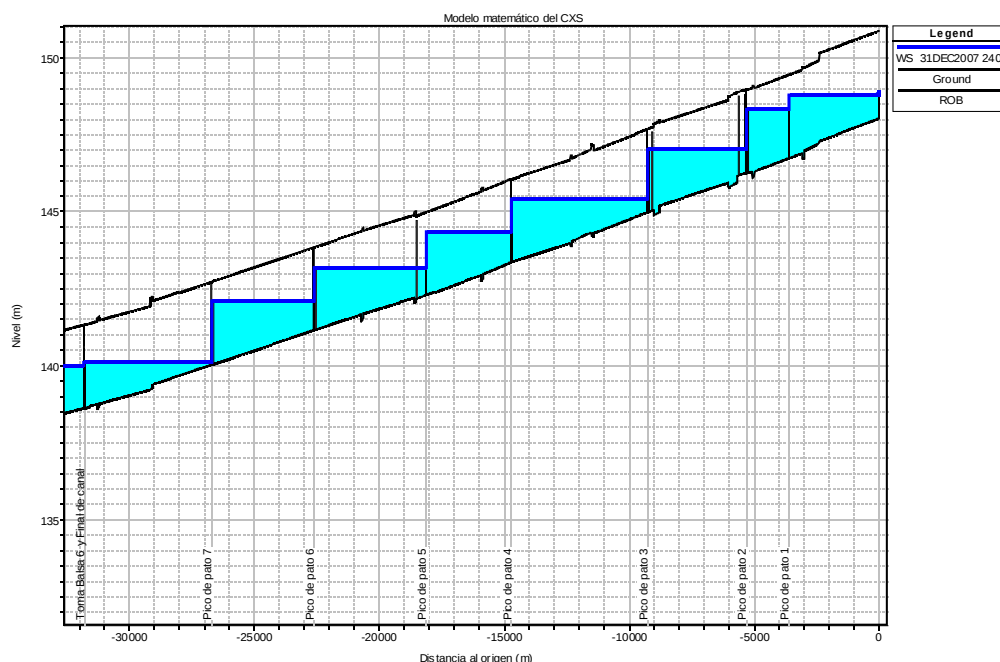
donde  $L_1$ ,  $L_2$  y  $S_2$  son longitudes y las superfi-

cies de proyección en planta de la solera y de la balsa totalmente llena, respectivamente;  $H$  es el calado máximo y  $m$  es el talud de la balsa.

El resultado final de la aplicación de la ec.(1) puede verse en la Tabla 1.

#### Coeficiente de rugosidad de Manning

De todos los coeficientes empíricos que se utilizan en la modelización del flujo en lámina libre, el coeficiente de rugosidad de Manning es el que tiene más relevancia. Y es también el más desconocido y difícil de medir en campo y puede presentar una gran variabilidad. Se acepta que cuando un canal prismático es de nueva construcción y el revestimiento es de hormigón, presenta un coeficiente de rugosidad de  $n = 0,014$  (Ven Te Chow, 1994). Por otro lado, nuestra experiencia nos demuestra que cuando un canal, revestido de hormigón, que ha estado reparado de forma asidua pero que ya lleva unos cuantos años en uso, puede presentar unos valores alrededor de  $n = 0,020$ . En la Figura 6 se muestra alguno de los análisis comparativos hechos para solventar esta cuestión.



**Figura 7.** Condiciones iniciales de todos los ensayos y escenarios. Fuente: software HEC-RAS.

#### *Coefficiente de desagüe de los vertederos*

El caudal desaguado por un vertedero de labio fino sigue la expresión:

$$q = C_d \times L \times (y - y_0)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

donde  $y$  es el calado en  $m$ ;  $q$  es el caudal desaguado en  $m^3/s$ ;  $L$  es la anchura del labio en  $m$ ;  $y_0$  es la altura sobre la solera del labio del vertedero en  $m$ ;  $C_d$  es el coeficiente de desagüe que vale (Coutinho de Lencastre y Robles, 1998)

$$C_d = 1,778 + \frac{y - y_0}{y_0} \quad (3)$$

El coeficiente de desagüe utilizado en el modelo es 1,876.

#### **Condiciones iniciales**

En cuanto a las condiciones iniciales hay que decir que en todos los escenarios y ensayos numéricos realizados se han tomado las mismas condiciones iniciales:

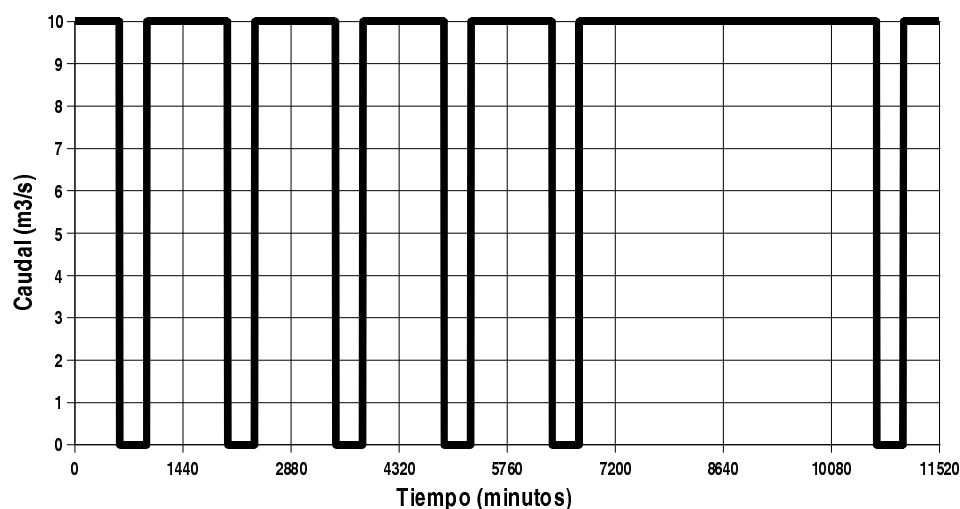
- Balsas enrasadas totalmente llenas al mismo nivel que el vertedero tipo “pico de pato” situado justo aguas abajo de la derivación lateral y sin consumo.
- El caudal circulante nulo (Figura 7).
- Nivel constante a cota 140 m sobre el nivel del mar en el extremo del último tramo.

A la vista de la Figura 7 cabe destacar los siguientes puntos:

- Los vertederos números 1 y 5 no tienen asociada ninguna toma.
- El último tramo de canal es ficticio y suficientemente largo como para anular el efecto de la condición de contorno sobre la toma de la balsa B6. Este tramo se tiene que implementar para poder establecer el nivel constante aguas abajo como condición de contorno de un canal en régimen subcrítico como el estudiado.

#### **Condiciones de contorno: operación del canal**

Un vez definidas la geometría del problema y las condiciones iniciales, queda por definir las condiciones de contorno. Estas condiciones sirven para definir el escenario de funcionamiento del canal que se pretende analizar. Dado que son muchas las posibles combinaciones de bombeo y de derivación de caudal desde las balsas de *regulación de canal* -cada una de las cuales define un escenario de funcionamiento diferente-, en este trabajo solamente se presentan tres escenarios representativos del funcionamiento habitual del canal. Pero antes de definir éstos, hace falta mostrar los hidrogramas de caudal de entrada y de salida del *Sistema*.



**Figura 8.** Representación del hidrograma de caudal de entrada de agua al sistema o hidrograma de bombeo en un ciclo de 7 días más 1. Este hidrograma sirve para la definición de la condición de contorno de aguas arriba del canal que se implementa en todos los escenarios

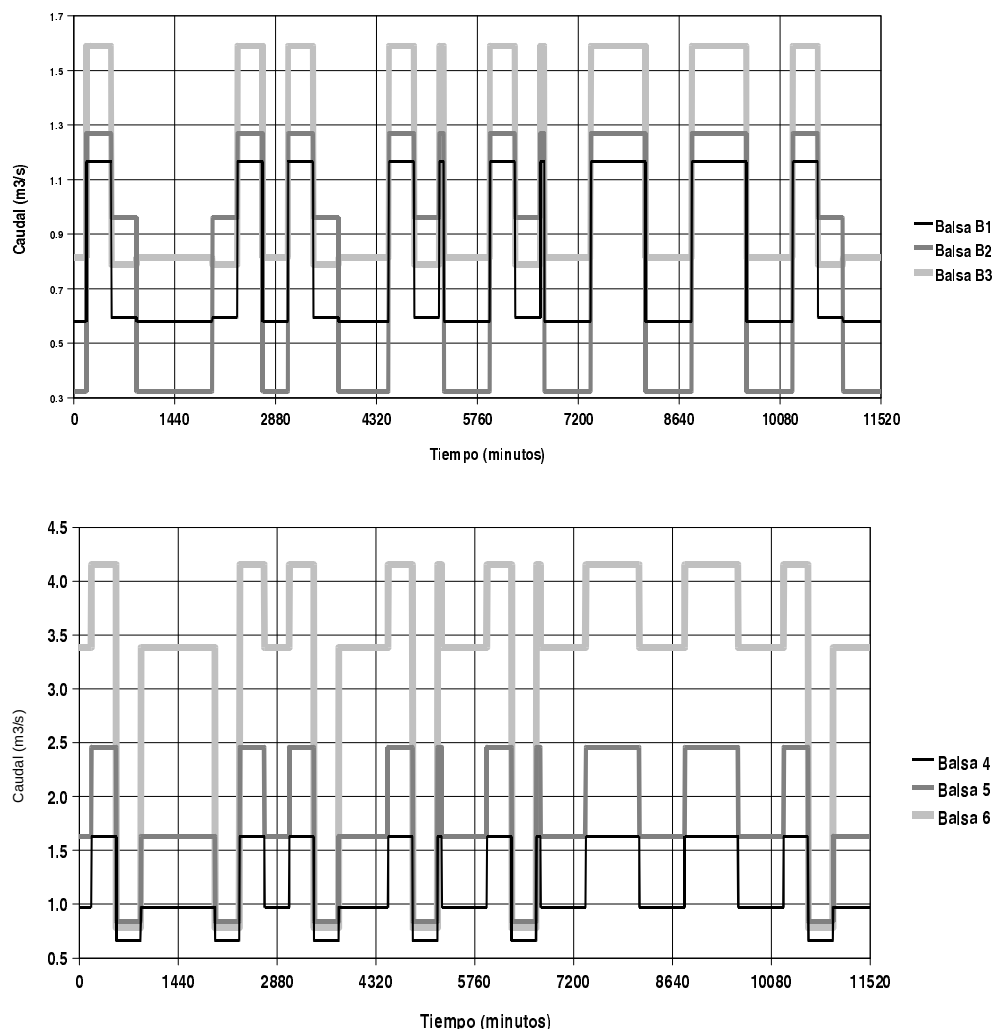
Como ya se ha dicho anteriormente, el bombeo se hace durante el período de menor coste eléctrico, es decir, durante los períodos denominados popularmente como Horas valle y Horas planas. Estos dos períodos se establecen por ley y son diferentes en función del día de la semana. Así, los días entre semana el período de bombeo se establece en las dieciocho horas que van desde las 0:00 h de la medianoche hasta las 10:00 h de la mañana y desde las 16:00 h de la tarde hasta a las 24:00 h de medianoche y los días de fin de semana, el período de bombeo dura todo el día, desde las 0:00 h hasta las 24:00 h. La composición semanal que resulta de aplicar estas condiciones se puede ver en la Figura 8.

En el extremo de aguas abajo del canal se tiene que introducir una condición de nivel constante para que el problema matemático esté bien planteado. Dado que el canal termina ciego, la única condición de contorno conocida es la de caudal nulo y por lo tanto, no se puede aplicar una de nivel, puesto que es una incógnita. Así que, para resolver esta dificultad se ha implementado un tramo de canal ficticio adicional suficientemente largo como para que se pierda la influencia de las condiciones de contorno sobre el canal real. Al tramo de canal ficticio se le ha aplicado la condición de nivel constante a cota igual a 140,0 m.

Habiendo integrado las necesidades de agua de todos los sectores que cuelgan del CXS, se llega a la definición de las demandas de agua que se extraerán de cada una de la Balsas de *regulación de canal*. Como ya se ha dicho, de

cada balsa de regulación de canal se extrae agua a través de un bombeo a otras balsas (que por coherencia también tendrán el mismo comportamiento horario que el bombeo de cabecera) y directamente a la red secundaria por gravedad de los sectores que cuelgan de dichas balsas. Teniendo en cuenta estos criterios, los hidrogramas de extracción de agua han sido sacados del estudio agronómico del proyecto y sirven para definir las condiciones de contorno de las balsas (Figura 9). Hay que decir que, en el momento de la realización del estudio hidráulico, los datos con los que se han construido la gráficas de dicha figura son meras estimaciones del consumo máximo en el mes de máxima demanda.

Como ya se ha dicho anteriormente, existe una gran cantidad de situaciones susceptibles de ser estudiadas, cada una de la cuales necesita establecer sus condiciones de contorno mediante hidrogramas como los mostrados en las Figuras 8 y 9. En este trabajo se muestran tres escenarios con los que se pretende poner a prueba la fiabilidad y la robustez del sistema pasivo de control propuesto. Todos estos escenarios tienen como condición de contorno de aguas arriba el mismo hidrograma mostrado en la Figura 8, y el mismo hidrograma de nivel constante para el tramo ficticio como condición de contorno de aguas abajo. Por lo tanto, los tres escenarios se diferencian exclusivamente en los hidrogramas de consumo de las balsas (Figura 9) y en las trayectorias de las compuertas verticales de retorno controlado de la almenara (Figura 2).



**Figura 9.** Representación de los hidrogramas de caudal de salida de agua del Sistema a través de las seis balsas de regulación de canal. Cada curva es el resultado final de la suma de hidrogramas previstos de bombeo y de gravedad: H1B+H1G, H2B+H2G, H3B+H3G, H4B+H4G, H5B+H5G y H6B+H6G de la Figura 1. Estos hidrogramas definen las condiciones de contorno

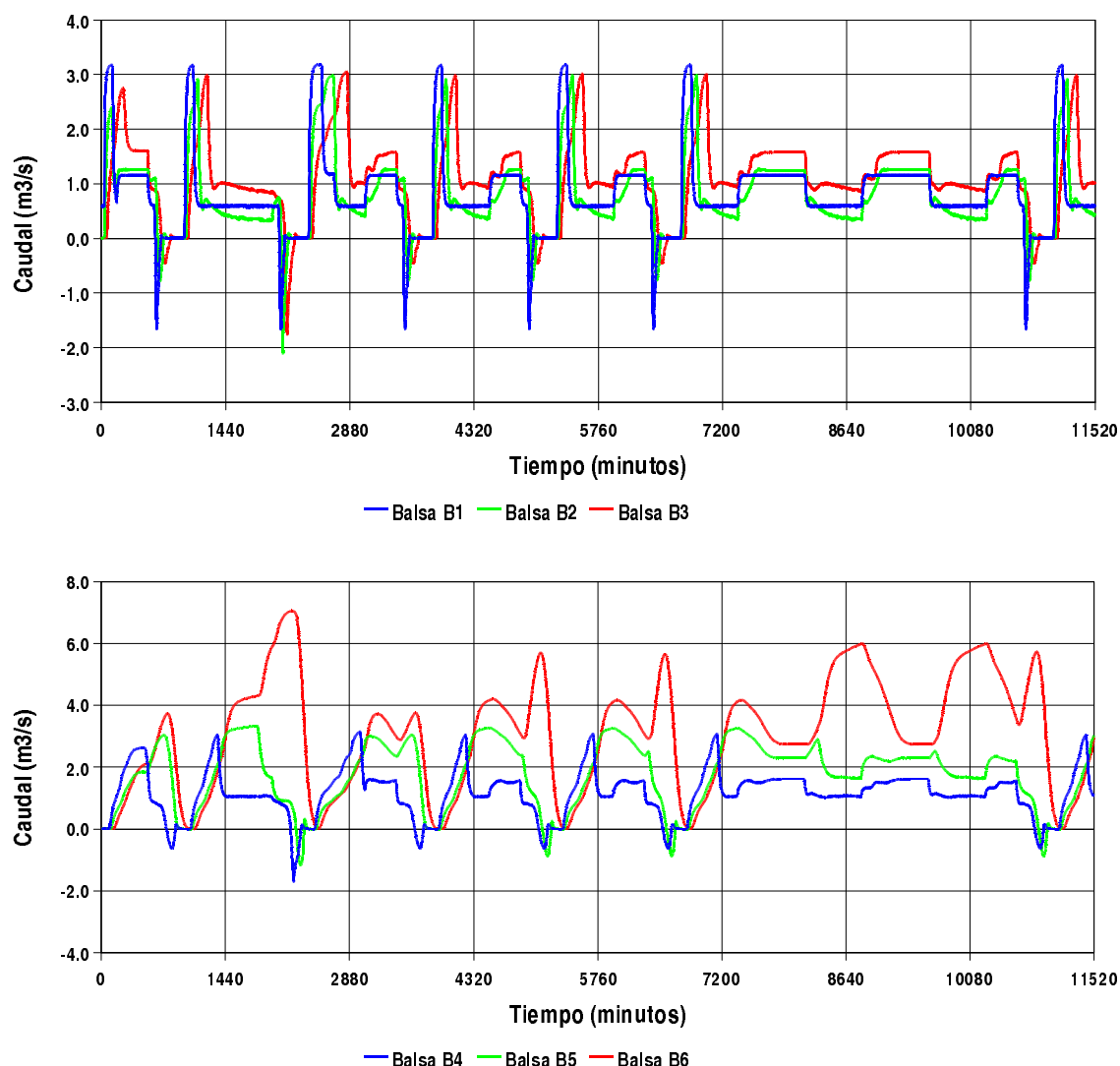
Los escenarios estudiados aquí son los siguientes:

**Escenario 1:** se propone bombear las dieciocho horas de los días laborables y las veinticuatro de los fines de semana según se muestra en la gráfica de la Figura 8 y consumiendo agua según los hidrogramas de la Figura 9. El escenario pretende determinar qué pasa con los niveles de agua del canal y de las balsas y si estas tienen suficiente capacidad de regulación, etcétera. Este escenario de funcionamiento habitual corresponde al “nominal” y las compuertas verticales de retorno controlado permanecen cerradas los ocho días de simulación.

**Escenario 2:** es el mismo escenario que el anterior pero se diferencia en que se retorna al

canal parte del agua de las balsas de forma regulada a través de las compuertas verticales de retorno controlado.

**Escenario 3:** se propone intercambiar los hidrogramas de consumo de las balsas mediante un cambio de las condiciones de contorno para intentar evidenciar el grado de robustez del sistema de control pasivo ante cambios de demanda. Se proponen los siguientes cambios: el hidrograma de consumo de la balsa B6 (Figura 9) pasa a ser ahora el hidrograma de consumo de la balsa B1, el de la balsa B1 pasa a ser el de la balsa B2, el de la balsa B2 pasa a ser el de la balsa B3 y así sucesivamente. En este escenario las compuertas verticales de retorno controlado permanecen cerradas los ocho días de simulación.



**Figura 10.** Gráficas donde se representa la evolución de los caudales entrantes en las balsas a lo largo de un ciclo semanal más un día del Escenario 1

## RESULTADOS

### Escenario 1

#### *Evolución de los caudales entrantes en las balsas*

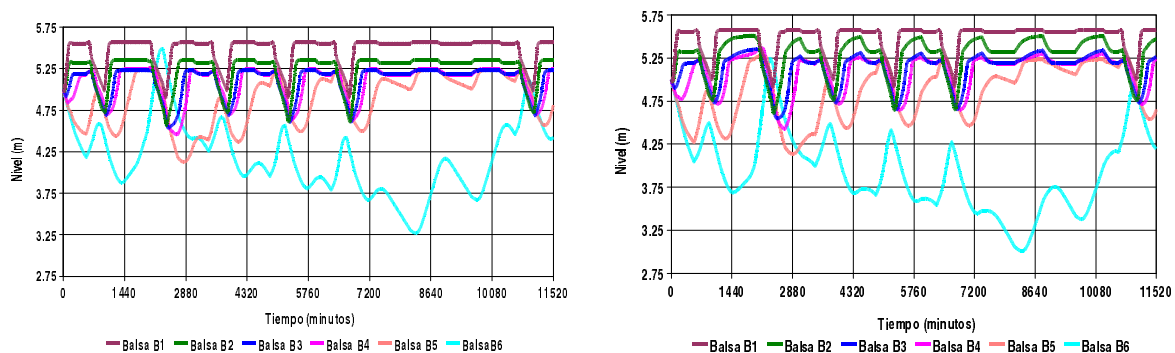
El caudal de paso a través de los “Vertederos laterales de regulación de labio fino” en las almenaras (Figura 2) se muestra en la Figura 10.

A la vista de la Figura 10, cabe destacar lo siguiente:

- El caudal entrante va cambiando de signo dos veces por día, a cada ciclo de bombeo. El comportamiento de las balsas B1 a B5 es semejante:
  - se inicia la entrada de agua con un gran caudal como indica el primer pico positivo. Esto se explica porque la balsa se encuentra vacía y por

tanto, el vertedero funciona libre, no inundado, a su máxima capacidad de desagüe. Esta primera etapa es la que se ha llamado anteriormente de *llenado rápido*,

- la entrada continua a un caudal cada vez más pequeño que se va aproximando al caudal de extracción que hay en cada momento en la balsa. Esta etapa es la denominada de *balance neutro* y,
- finalmente, el ciclo se acaba con otro pico de caudal, pero esta vez, de salida, de retorno al canal. Es la etapa en que el canal baja su nivel porque ya se ha dejado de bombear desde cabecera y es la que se ha llamado anteriormente de *vaciado rápido*.



**Figura 11.** Gráficas donde se representa la evolución del nivel de las balsas a lo largo de un ciclo semanal más un día del Escenario 1. En la gráfica de la izquierda  $n=0,014$  y en la de la derecha  $n = 0,020$

- El instante de llegada del primer pico en cada jornada es, tal como era de prever, más tardía a medida que la balsa se encuentra más aguas abajo. Hay dos razones del por qué pasa esto: la primera y más obvia, es por el hecho de que las perturbaciones (cambios de caudal y nivel resultado de determinadas operaciones de control) tardan cierto tiempo en viajar ya que la celeridad de las ondas en el flujo en lámina libre es pequeña y la segunda, el caudal de entrada a las balsas es más grande del que se necesita en la etapa posterior de *balance neutro* y hasta que una balsa de aguas arriba no está totalmente llena -momento en que la misma balsa no deja entrar más agua- el frente no puede crear el siguiente pico en la balsa de aguas abajo. Precisamente éste es el efecto de laminar que se busca con los depósitos de retención de pluviales en las redes de saneamiento: retardar y suavizar los picos de caudal.
- Puesto que el efecto de retraso de la llegada del pico de caudal a la balsa B5 es tan grande y puesto que los hidrogramas de salida de las balsas no son cíclicos porque presentan tres modelos de comportamiento a lo largo de una semana, ya no es posible identificar claramente las etapas descritas en el primer punto. Concretamente, no se identifica en ningún momento la etapa de *balance neutro* en ningún momento de la semana. La línea de balance cruza el caudal neutro solamente en determinados instantes y no en determinados períodos, como pasa en las cuatro primeras balsas. No obstante, la balsa B5 recupera el nivel, excepto el martes, como es veré más adelante.
- Puesto que la balsa B6 está desacoplada

del canal, es decir, a una cota inferior, el agua que ha entrado en la balsa ya no puede retornar al canal; tal y como indica el hecho de que la línea de caudal entrante nunca toma valores negativos. Su situación de embalse de cola hace que se le acumulen todos los desajustes semanales -desajustes que son debidos al hecho de que durante los cinco primeros días del ciclo entra menos agua al sistema de la que sale- de todas las balsas (las cinco primeras recuperan cada día su nivel a costa de dejar de llenar la sexta). No obstante, cuando llega el fin de semana, entra más agua al sistema de la que sale y la balsa B6 se recupera.

#### *Evolución de los niveles de las balsas*

Uno de los resultados más importantes por su influencia sobre el control general de todo el sistema es la evolución semanal del nivel que tienen las balsas (Figura 11).

A la vista de la Figura 11, cabe destacar lo siguiente:

- Las cuatro balsas de aguas arriba recuperan diariamente el nivel inicial de 5 m, la balsa B5 lo hace todos los días excepto el miércoles y la balsa B6 no recupera su nivel inicial hasta que se acaba la semana.
- Al inicio de la simulación, todas las balsas se encuentran completamente llenas y acaban llenas al octavo día.
- La balsa B6 ha sido diseñada de manera no enrasada con el canal, es decir, a una cota inferior a la solera del mismo. De esta forma, el desagüe a través del vertedero lateral de conexión entre balsa y canal será siempre libre e independiente del nivel

de la balsa. En consecuencia, este nivel no interferirá con el del canal.

- Durante la simulación se consume todo el resguardo del canal en algunos momentos que es de un metro aproximadamente y por este motivo el nivel de las balsas es superior a los 5 m (véase Nivel 1 en la Figura 5).
- Como era de esperar, la lámina de agua en el canal tiene un nivel superior cuando se considera un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,020 que cuando se usa 0,014. Por este motivo, el nivel máximo de la lámina en las balsas también resulta superior cuando dicho coeficiente es 0,020. En otras palabras, se dispondrá de mayor volumen de almacenamiento en las balsas a medida que el sistema envejezca. Por este motivo, en el periodo 7200 min. a 8640 min., la balsa B6 llega a un punto mínimo inferior porque el agua es "capturada" en mayor cantidad por las balsas B1 a B5.
- El comportamiento cualitativo de ambas gráficas puede considerarse equivalente. Un vez más, el control hidráulico mediante vertederos laterales y con la balsas enrasadas que se propone resulta adecuado para asegurar la estabilidad con el paso del tiempo.

## Escenario 2

Con este escenario se pretende poner en evidencia los efectos beneficiosos de tener las balsas parcialmente vacías a la hora de iniciar un bombeo en cabecera. De esta manera se lamina mejor el hidrograma. La manera de conseguir esto es vaciando las balsas cuando el canal se encuentra parado a caudal nulo, cuando no se está bombeando. El vaciado de las balsas se hace a través del propio canal mediante las compuertas de retorno controlado.

Se han realizado 6 simulaciones, tres de las cuales corresponden a un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,020 y las otras tres a uno de 0,014 y el efecto laminador que presenta una variación de este coeficiente tiene más importancia que la que en un principio resulta lógico esperar como se puede deducir de los resultados mostrados en la Figura 11 correspondientes al Escenario 1. Con estos tres casos se pretende visualizar el efecto laminador de una manera gradual:

- En el primer caso, que es el Escenario 1, las compuertas de retorno están siempre cerradas.

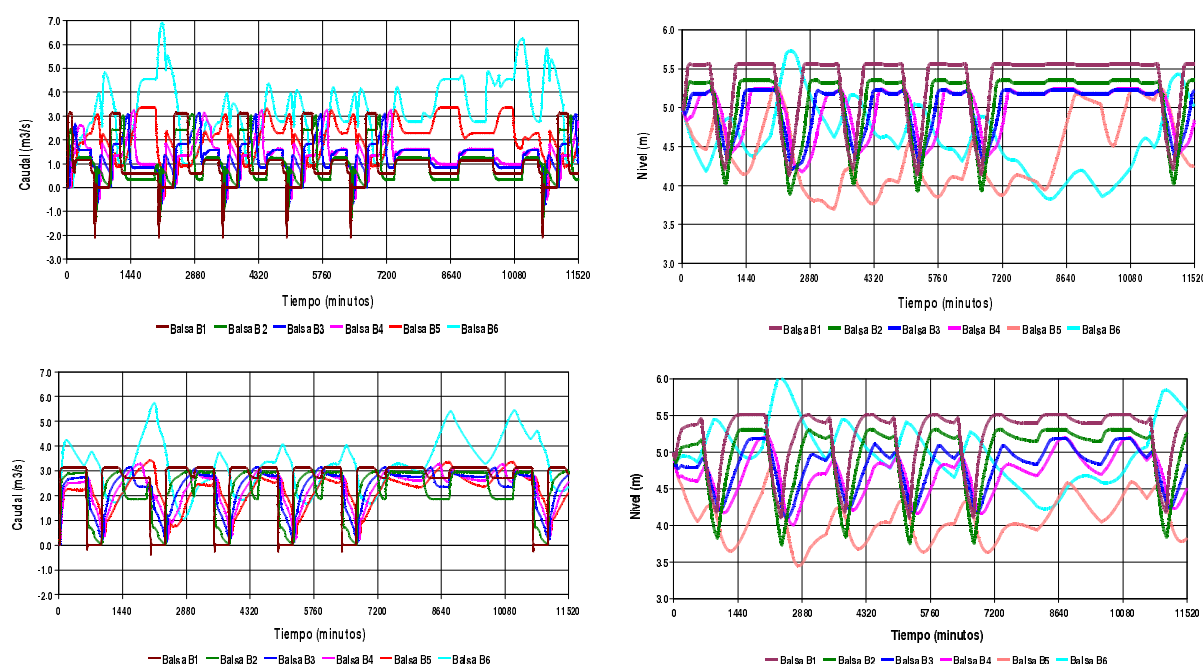
- El segundo caso se simula con las compuertas de retorno controlado abiertas durante 5 horas los días entre semana, de las 12 h hasta las 17 h.
- En el tercer caso se mantienen las compuertas de retorno siempre abiertas de 0 h a 24 h, todos los días de la semana.

Hay que hacer notar que el canal se mantiene 18 horas al día a su máxima capacidad de transporte a un régimen aproximadamente estacionario donde el gradiente hidráulico entre la balsa y el canal favorece la salida de agua del canal a la balsa y no a la inversa. En consecuencia, el retorno se puede producir sólo durante las 6 horas restantes. Además, aunque las compuertas de retorno sean muy anchas y estén siempre abiertas, las balsas no se vacían nunca al 100 % de su recorrido ya que cuando el canal vuelve "a estar lleno" por los retornos se impide la salida de las balsas. Por lo tanto, el tercer caso de estudio, el segundo de este Escenario, muestra el máximo aprovechamiento de la capacidad de laminación del sistema cuando el canal funciona a pleno rendimiento.

### *Evolución de los caudales entrantes y los niveles en las balsas*

A la vista de las gráficas de las Figuras 11 y 12 cabe destacar los siguientes puntos:

1. La anchura de la oscilación máxima de las balsas B1 a B5 no supera 1,6 m en ninguna de las simulaciones. En este sentido, el recorrido máximo posible permitido por el sistema -entendido como la distancia entre la cota del vertedero lateral de regulación y la cota del fondo de la compuerta vertical de retorno controlado- no es aprovechado en su totalidad en ninguna de las balsas B1 a B5 en ninguna simulación. La razón de esto es que quien realmente controla la salida de las balsas es el nivel en el canal, el cual es demasiado alto durante 18 h al día, y no el grado de abertura de la compuerta de retorno controlado (Figura 2).
2. Las balsas B1 a B5 recuperan diariamente el nivel inicial de balsa del 100 % de llenado. Esto significa que no hay ningún desajuste semanal del balance entre la entrada y la salida. Por consiguiente, las balsas B1 a B5 no requieren ningún volumen suplementario para este concepto.



**Figura 12.** Gráficas donde se representa la evolución del caudal entrante y los niveles en las balsas a lo largo de un ciclo semanal más un día del Escenario 2. En las gráficas de arriba, se abren cinco horas al día -de 12 h a 17 h de lunes a viernes- y en las de abajo se mantienen permanentemente abiertas. Estas simulaciones han sido hechas con un coeficiente de rugosidad de Manning  $n = 0,014$

3. Por otro lado, la balsa B6 acumula todos los desajustes semanales y a medida que las compuertas de retorno controlado se mantienen abiertas durante más tiempo, este desajuste es menor.

### Escenario 3

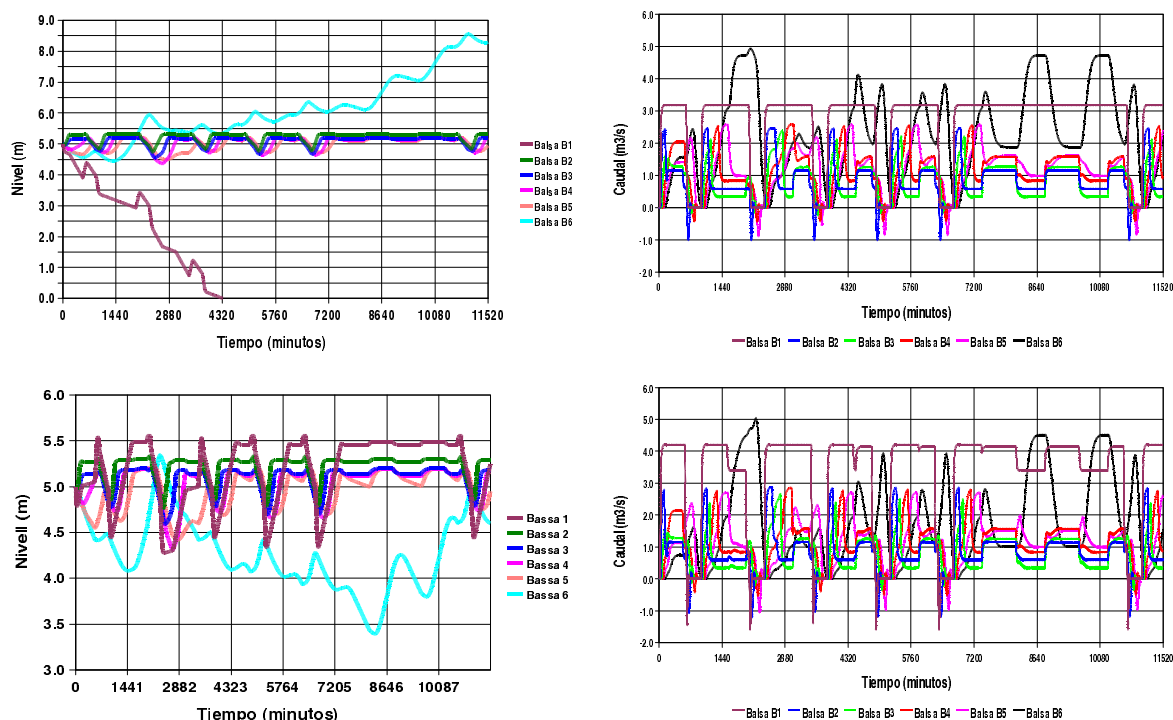
Con este escenario se pretende poner en evidencia el grado de robustez del sistema a cambios de demanda de las balsas. Se trata de un cambio de condiciones de contorno que pudiera reflejar cambios futuros del área de riego, tipo de cultivo, etcétera. Manteniendo el hidrograma de caudal de entrada por cabecera del canal, se propone intercambiar los hidrogramas de caudal de salida de cada balsa de la Figura 9 de la siguiente manera: el hidrograma de caudal de salida de la balsa B1 pasa a ser el de la balsa B6, el de la balsa B2 pasa a ser el de la balsa B1, el de la balsa B3 el de la balsa B2 y así sucesivamente para el resto de las condiciones de contorno. En la Figura 13 se pueden ver los resultados de la simulación.

A la vista de los gráficos de la Figura 13 cabe destacar los siguientes puntos:

- La falta de caudal de entrada a la balsa

B1 del caso que se muestra en la parte superior se explica por la poca longitud del vertedero que es de 25 m; mientras el caudal demandado a la balsa llega a ser de  $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , el caudal máximo de entrada es de  $3,18 \text{ m}^3/\text{s}$  lo que indica un claro déficit de caudal.

- El intercambio de hidrogramas propuesto no es soportado por el sistema con una longitud del labio de 25 m porque se vacía totalmente la balsa B1, tal y como se muestra en el gráfico superior de mano izquierda.
- El agua que no resulta “captada” y no entra a la balsa B1, se vierte a la balsa B6 de manera que esta balsa recibe más agua que la que consume y por lo tanto su nivel siempre aumenta. La principal razón de ello vuelve a ser que la falta de caudal entrante a la balsa B1 es exceso de caudal de entrada en la balsa B6.
- A pesar de los puntos anteriores, un intercambio de hidrogramas entre la balsa B1 y la balsa B6 tan importante de seguro que no se producirá.



**Figura 13.** Gráficas donde se representan los resultados de las dos simulaciones correspondientes al Escenario 3: en la parte superior se muestra el caso con una longitud del vertedero lateral de balsa B1 de 25 m y en la parte inferior el caso con una longitud de 40 m. A mano izquierda se muestran las evoluciones de los niveles de agua y a mano derecha los caudales entrantes a las balsas

- La acumulación en la balsa B6 del caudal no “capturado” por el resto de balsas llena totalmente dicha balsa, tal y como se puede ver en la gráfica superior izquierda. Por este motivo, esta balsa deberá no estar enrasada con el canal: si fuera así, el último tramo desbordaría. Por consiguiente, es necesario que la balsa B6 no esté acoplada al canal y que contenga un vertedero de seguridad por donde evacuar el agua sobrante del Sistema.
- Cuando la longitud del “Vertedero lateral de regulación” de la balsa B1 es de 40 m, el caudal máximo entrante a la balsa B1 es de  $4,21 \text{ m}^3/\text{s}$  y por lo tanto resulta suficiente para alimentar su demanda. Por consiguiente, el nivel se recupera diariamente.
- La disparidad de resultados mostrados pone de manifiesto la gran sensibilidad que tiene el sistema de regulación pasivo a la longitud de los vertederos laterales de regulación. Si las demandas extraídas de cada una de las balsas fueran exactamente conocidas, el cálculo de la longitud de los vertederos sería bastante exacto si se

utilizara la ec.(3). Por suerte, el coste de una ampliación de un vertedero lateral no es muy excesivo en comparación a la ejecución de todo el proyecto del CXS, de manera que siempre se podrá adaptar las longitudes a las demandas reales.

- Como corolario final del Escenario 3, dados los efectos perniciosos que comporta el hecho de no “captar” el agua, es del todo recomendable favorecer al máximo el flujo de agua a través de la conexión entre balsa y canal.

## CONCLUSIONES

Finalmente, se procede a enumerar las conclusiones finales del estudio:

1. Se ha implementado un modelo matemático de flujo no estacionario en lámina libre que permite predecir el comportamiento del Canal de Xerta-Sénia con la versión 3.1.3 del programa informático HEC-RAS. La presencia en este canal de un bombeo en cabecera genera fuertes transitorios, puesto que se pretende bombear durante el período de tarifa eléctrica más

económica. Por ello, la elaboración del modelo ha resultado indispensable.

2. En base a este modelo se ha diseñado un sistema de control pasivo del canal -denominado de esta forma porque se trata de un sistema que no requiere prácticamente intervención humana, ya que el transporte y la distribución de agua a lo largo del canal se produce sin partes móviles ni mecanismos hidráulicos- que tiene fuertes implicaciones constructivas y por lo tanto, es en la fase de proyecto cuando se ha tenido que implementar.
3. Las decisiones de carácter constructivo tomadas tras la aplicación del modelo han sido: incorporación cada cierta distancia de vertederos de gran capacidad de desagüe en línea tipo "pico de pato" para maximizar la celeridad de onda, enrasar la balsas de pie de canal de manera que el agua puede ir indistintamente de balsa a canal y viceversa a través de un vertedero lateral de regulación, unificar posiciones de los vertederos "pico de pato", vertederos laterales de regulación y balsas generando puntos de regulación-control y proyectar una conducción tipo "by pass" que permita ultrapasar el vertedero tipo "pico de pato" mediante el correspondiente juego de compuertas verticales.
4. Con la configuración de los puntos de regulación y control, la propuesta de sistema de regulación pasiva es la siguiente: *"Solamente hace falta bombear en las horas de menor coste eléctrico a un caudal que esté de acuerdo con los consumos realizados por cada sector en el ciclo anterior"*. Por lo tanto se trata de un sistema de distribución en lámina libre y a la demanda. El resto de tareas -como son la laminación de los hidrogramas, el control de los transitorios, el transporte y la distribución del agua entre las balsas, el control de niveles, etcétera- ya las hace de forma hidráulica el propio canal de una manera automática y robusta sin la intervención de nadie.
5. El sistema propuesto hace recuperar el nivel de las cinco primeras balsas cada día, con lo que dichas balsas no presentan ningún déficit de suministro provocado por el hecho de que los días laborables se bombea menos agua que la que consume el sistema. Por lo tanto, todo el déficit semanal se acumula en el embalse de cola, es decir, en la balsa B6, por lo que resulta adecuado acumular todo el VDS del Sistema.
6. Se han presentado tres casos de regulación llamados Escenario 1, Escenario 2 y Escenario 3. En todos los casos se bombea en cabecera 10 m<sup>3</sup>/s durante 18 horas a día los días laborables y durante 24 horas los días del fin de semana. Con el Escenario 1 se evalúa el comportamiento del canal ante los hidrogramas de diseño de consumo de agua de las balsas: se obtienen los niveles normales de funcionamiento. Con el Escenario 2 se muestra el efecto de redistribuir el agua de las balsas durante las 6 horas sin bombeo. Y finalmente, con el Escenario 3 se ilustra la robustez del sistema ante supuestos cambios de la demanda de las balsas del Escenario 1.
7. El Escenario 3 ha puesto de manifiesto la importancia que tiene la conexión entre la balsa y el canal para la robustez del "control pasivo de transitorios". Cuando la longitud del vertedero lateral de conexión limita el flujo de agua de manera que el caudal medio consumido por una determinada balsa no puede ser suministrado por su correspondiente vertedero, la balsa se vacía y el agua no detraída por el vertedero lateral perjudica las balsas de aguas abajo. No ocurre así si se procede a un sobredimensionamiento de los vertederos laterales.
8. Introducidos los escenarios en el modelo a través de las condiciones de contorno, se ha podido comprobar que el sistema es capaz de soportar perfectamente los tres escenarios si se amplía la longitud del vertedero lateral de la balsa B1. Dado el desconocimiento existente sobre la demanda real de cada sector a la hora de la realización del presente estudio, se recomendó el sobredimensionamiento de los vertederos laterales. No obstante, dado que no se esperan cambios de demanda tan importantes como los simulados por el escenario 3, la ampliación del vertedero de la balsa B1 resulta innecesaria. En condiciones de demanda parecidas a las previstas en el proyecto (condiciones del escenario 1), el canal puede funcionar totalmente "a la demanda" con los vertederos proyectados.

9. Se ha supuesto que la obra de conexión entre las balsas y el canal es muy fluida y se ha mostrado los efectos perniciosos que tiene sobre el sistema el hecho de no "capturar" el agua del canal en el momento adecuado. Esta suposición es necesaria porque con un modelo unidimensional no es posible reproducir el comportamiento de una obra de toma donde el flujo es claramente bidimensional.

---

## REFERENCIAS

- Barkau, R.L., (1992). UNET, One-dimensional unsteady flow through a full network of open channels. Computer Program for HEC-RAS, St. Louis, MO.
- Coutinho de Lencastre, A. y Robles, C., (1998). Manual de ingeniería hidráulica. Universidad Pública de Navarra.
- Malaterre, P.O., Rogers, D.C. y Schuurmans, J., (1998). Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124, 1.
- Manzanares, J.L., (1983). Regulación de canales ¿por qué, cuándo, cómo, ...?. Tema I del curso superior sobre Control automático de canales, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Sevilla.
- 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 de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ven Te Chow, (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw Hill.