
ANEXO I Canalfowmodel

1 INTRODUCCIÓN

El programa Canalfowmodel, de la Universidad de Zaragoza, es un programa diseñado para resolver numéricamente flujos transitorios en todo tipo de cauces, basado en computación en la nube sin necesidad de instalación local. La aplicación se ejecuta yendo a la dirección <http://canalfowmodel.net/> que ofrece la pantalla de la *Figura 1.1*. En ella se ofrece la creación de casos nuevos de tipo canal o de tipo río y la posibilidad de abrir un caso existente mediante el sistema de tickets.

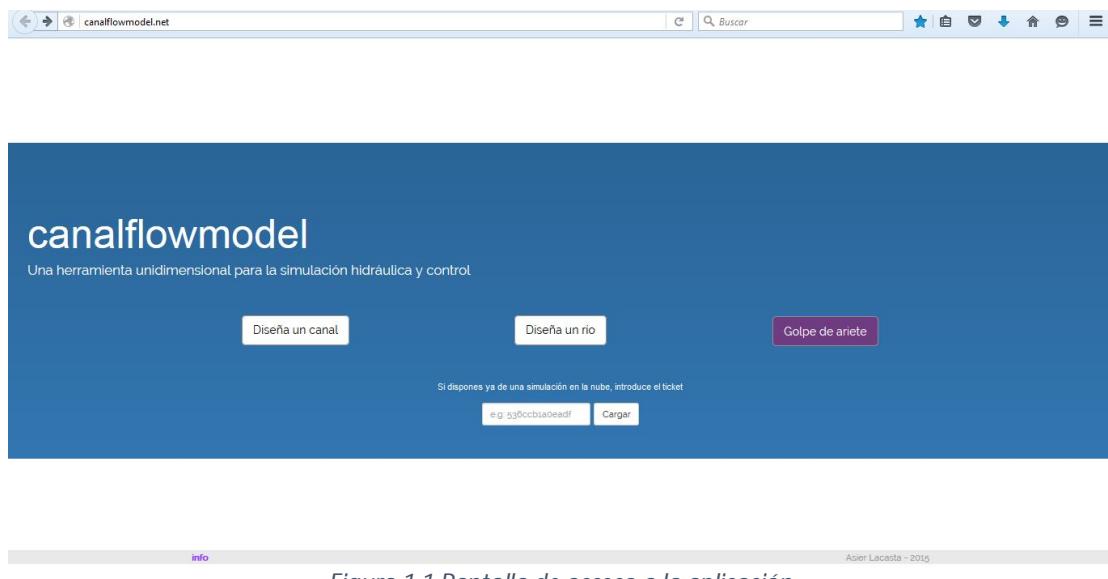


Figura 1.1 Pantalla de acceso a la aplicación

Describimos a continuación la secuencia a seguir para crear un nuevo caso. Si se parte de un ticket con un caso precargado hay que seguir estas mismas etapas pero con menos esfuerzo puesto que los datos ya están cargados. Al comenzar a usar el programa Canalfowmodel aparece en la barra superior de la pantalla una ventana con menús como la que se ilustra en la *Figura 1.2*.

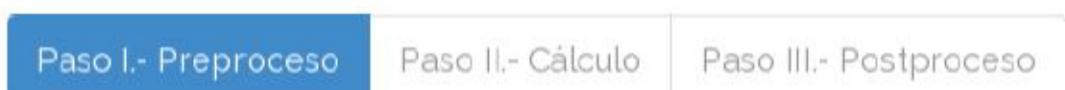


Figura 1.2 Menús del programa Canalfowmodel

2 PASO I: PRE-PROCESO

El pre-proceso define las propiedades que va a tener el elemento que se quiere simular. En este caso disponemos de una serie de herramientas que nos van a permitir configurar la geometría del caso, las Condiciones Iniciales que contendrán la situación inicial anterior a la simulación, las Condiciones de Contorno que definirán el tipo de entrada y salida que hay en la región a simular y el resto de Parámetro de simulación que permitirán establecer propiedades tanto del método numérico como de la aplicación en general.

2.1 GEOMETRÍA

Esta sección contiene los elementos que configurarán la parte geométrica del caso. La geometría consta de dos partes: la primera es la definición del tramo que se quiere simular y vendrá dado principalmente por la longitud del mismo y la segunda parte lo forman el número de secciones que lo definen.

Es importante definir al principio el número de secciones transversales en el cauce y el número de puntos que definen cada sección transversal. Esto se realiza pulsando el botón Propiedades.

peka.1D.cloud

Atención

Se va a cambiar las propiedades de la geometría. Esto implica que los puntos que se hayan generado hasta el momento se perderán.

Número de secciones	3	▲ ▼	Número de puntos	6	▲ ▼
---------------------	---	--------	------------------	---	--------

Figura 2.1.1 Definición del número de secciones y puntos

Habrá que definir una sección en los puntos donde haya compuertas transversales y en caso de tener que simular canales con geometría variable en cada tramo, deberemos definir secciones inmediatamente antes de las compuertas transversales. Así pues, por

ejemplo, si tenemos una sección para la compuerta transversal 1 y la siguiente sección la definimos justo antes de la compuerta transversal 2, estas dos secciones nos definirán la geometría de este tramo. Además al tener definidas dos secciones muy juntas (con una diferencia de 10 cm es suficiente) podremos modelizar un escalón, si es que lo tuviéramos justo en la sección de la compuerta transversal.

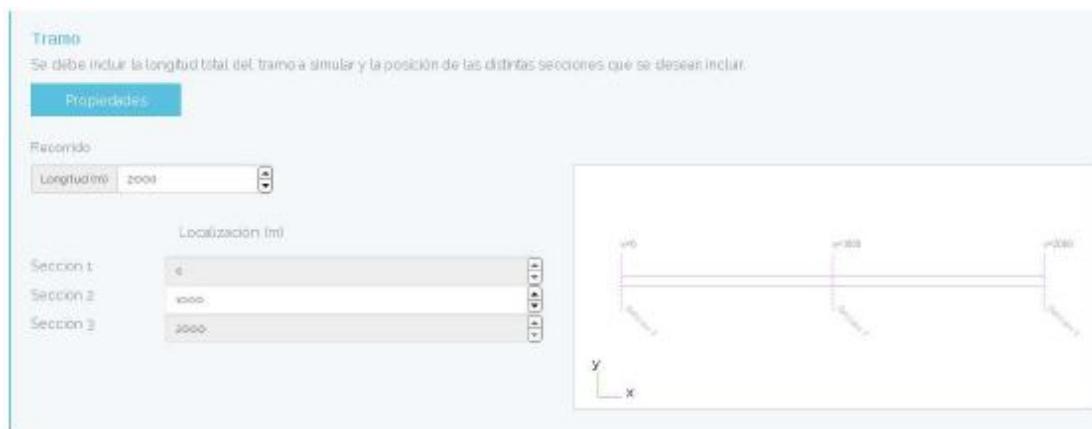


Figura 2.1.2 Definición de la posición de las secciones transversales

El número de puntos se define dependiendo de la geometría del canal, es decir, dependiendo de si es rectangular, trapezoidal, etc. Cada punto define la posición de cada vértice de la geometría en sección transversal. A la hora de definir cada sección transversal (ver *Figura 2.1.3*) deberemos comenzar por el final del canal, es decir, la última sección definida será la más alejada del inicio del canal y tendrá una altura de 0 m. Desde esta sección hacia las anteriores iremos aumentando la altura de cada sección dependiendo de la pendiente del canal a simular.

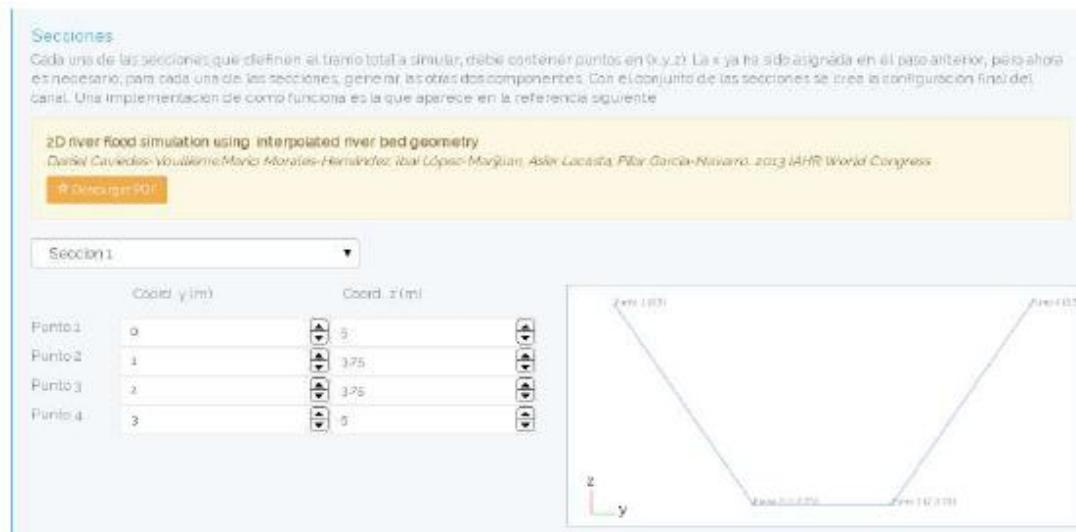


Figura 2.1.3 Definición de cada sección transversal

Además de la geometría, es necesario especificar valores asociados a las fuerzas de rozamiento generadas por el material del que está construido el canal o la rugosidad del fondo del cauce. En este modelo, esta rugosidad la aporta el coeficiente de fricción de Manning. Además de esto, es necesario especificar a partir de qué calado las fuerzas de rozamiento predominan y frenan el movimiento del agua. Este parámetro es el calado mínimo (en metros).

Coef de Manning	0,02	▼
Calado mínimo (m)	0,0001	▼

Figura 2.1.4 Definición del coeficiente de Manning y del calado mínimo

2.2 CONDICIONES INICIALES

Esta sección genera las condiciones iniciales del problema. Por condiciones iniciales se entiende el estado del que parte la simulación. Las opciones disponibles son las siguientes:

- Canal seco: caudales y calados nulos al principio de la simulación.
- $h+z$ cte: Se genera una condición de $h+z$ constante con velocidad nula.
- Q cte: Se genera el estado correspondiente con un caudal estacionario.
- h cte: Todas las celdas tendrán el mismo calado y velocidad nula.
- Roturas de presa (dambreak): Discontinuidad de calados con velocidad nula.

Normalmente partiremos con canal seco para simulaciones sencillas. En caso de haber un número importante de compuertas transversales es interesante comenzar la simulación con un caudal constante o una altura constante ya que esto puede evitar que el regulador PID cometa errores de cálculo iniciales.

Estado inicial

Selecciona una de las opciones disponible y establece el valor correspondiente

Q cte	▼	
Q (m ³ /s)	2.7	▼

Figura 2.2 Definición de las condiciones iniciales

2.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno detallan el comportamiento que tiene la entrada y la salida del dominio unidimensional. Se entiende que la condición de contorno de entrada especifica el comportamiento del tramo aguas arriba, siendo el sentido del flujo entrante en el dominio mientras que la condición de contorno de salida detalla el comportamiento aguas abajo. En este último caso, el sentido del flujo dependerá del tipo de salida y el régimen que se establezca a lo largo de la simulación.

Las opciones disponibles en la entrada son las siguientes:

- $h+z(t)$: Nivel superficial en función del tiempo.
- $Q(t)$: Caudal en función del tiempo.
- $h(t)$: Calado en función del tiempo.

Normalmente introduciremos un caudal en función del tiempo, donde éste será variable a lo largo del tiempo como el de la *Figura 2.3.1*.



Figura 2.3.1 Definición de las condiciones de entrada

Las opciones disponibles en la salida son las siguientes:

- Libre: No se impone ninguna condición
- $h+z(t)$: Nivel superficial en función del tiempo.
- $Q=Q(h+z)$: Caudal en función del nivel superficial
- Froude constante



Figura 2.3.2 Definición de las condiciones de salida

2.4 COMPUERTAS LATERALES

Existe la posibilidad de habilitar elementos regulables tales como compuertas laterales y compuertas transversales al flujo. Para empezar se introduce el número total de elementos de regulación en una ventana como la que se muestra en la *Figura 2.4.1*.



Figura 2.4.1 Definición de los elementos de regulación

Cada compuerta lateral se caracteriza por su posición, su anchura, su coeficiente de descarga (menor o igual a 1) y la historia temporal de aperturas como la que se muestra en la *Figura 2.4.2*.

A la hora de introducir los datos de la toma lateral en Canalfowmodel ésta se coloca en la base de las paredes laterales del canal. Esto es un detalle importante porque el caudal de extracción de la toma lateral no sólo va a depender de la geometría de ésta, también va a depender del calado que halla en el canal en ese punto.

El caudal de extracción de una toma lateral está modelado bajo la siguiente ecuación: $Q_L = KAB\sqrt{h}$ donde:

- **Q_L**: Caudal lateral
- **K**: Constante relacionada con las pérdidas debido a la inexactitud de la geometría.
- **A**: Anchura de la toma lateral
- **B**: Apertura de la toma lateral
- **h**: Calado existente en el canal en la zona de la compuerta

La constante K sirve como factor corrector de la geometría y va a tener un valor de 0,8. Éste factor se aplica a la hora de simular casos académicos. En caso de simular un canal real, se conocen exactamente las dimensiones de las compuertas laterales, por lo tanto la geometría es exacta y este factor tendría un valor de 1. La anchura es un valor fijo y la apertura de la toma lateral es un dato variable a lo largo del tiempo, pero no está regulada por el controlador PID, es decir, la apertura deberá ser modificada manualmente. Por último el término h es el que nos va a hacer variar el caudal de extracción a pesar de tener una geometría determinada, por lo tanto cuanto más calado tengamos en ese punto donde se encuentra la compuerta lateral, más caudal de extracción tendremos. También hay que tener en cuenta que este término incrementará el caudal pero levemente, un aumento muy significativo del calado aportará un leve aumento del caudal de extracción.

Los datos de las tomas laterales vienen impuestos por el canal a simular en cuestión, es decir, ya tienen unas dimensiones específicas. A través de las simulaciones podemos ver el caudal de salida que pueden suministrar. Esto supone una restricción ya que si la demanda de agua en una toma lateral es superior no se podrá satisfacer esta demanda. Hemos visto que se puede aportar un poco más de caudal aumentando el calado del canal pero si sólo se podría solucionar este problema aumentando el área de la toma lateral.

Configuración de compuerta 5

Posición (m)	2399	Anchura (m)	0,67	K	0,8	<input checked="" type="checkbox"/> Lateral	<input type="checkbox"/> Automática
Número de puntos	6						
Tiempo (s)		Apertura/Objetivo (m)					
0		0,3					
7199		0,3					
7200		0,6					
50399		0,6					
50400		0					
86400		0					

Figura 2.4.2 Parámetros de una compuerta lateral

2.5 COMPUERTAS TRANSVERSALES

Cada compuerta transversal se caracteriza por su posición, su coeficiente de descarga (menor o igual a 1) y la historia temporal de aperturas o de valores objetivo del calado aguas arriba como la que se muestra en la *Figura 2.5*. Para posibilitar la regulación conforme a un objetivo hay que marcar la casilla Automática y configurar el controlador PID como se muestra en la *Figura 2.6.1*. Si queremos regular el canal automáticamente esta opción es la deseada para ver cómo el controlador es capaz a través de datos de entrada (nivel superficial aguas arriba de la compuerta transversal) obtener mediante una acción (movimiento de la compuerta transversal) el resultado deseado (altura objetivo).

La anchura en el caso de las compuertas transversales no es necesario definirla ya que la compuerta transversal ocupa toda la sección transversal.

Configuración de compuerta 9

Posición (m)	7000	Anchura (m)	1,2	K	0,8	<input type="checkbox"/> Lateral	<input checked="" type="checkbox"/> Automática
Número de puntos	2						
Tiempo (s)			Apertura/Objetivo (m)				
0	2,1	86400	2,1				

Figura 2.5. Parámetros de una compuerta transversal

2.6 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Son los valores necesarios para el motor de cálculo de nuestra herramienta de simulación relacionados con los métodos numéricos que resuelven el sistema de ecuaciones que configura el flujo en canales. Escoger los valores correctos para cada simulación no es sencillo, con lo cual se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros de simulación del controlador PID de la compuerta transversal (*apartado 3.8*).

Configuración Regulación Versión Beta

Configura los parámetros con la regulación del tramo a simular. Esta regulación puede hacerse a través de distintos métodos. Por el momento, se permite incluir una compuerta regulada a través de un controlador PID. Puedes consultar más información de esta técnica en la contribución:

Simulation of PID Control Applied to Irrigation Channels
Asier Lacasta, Mario Morales-Hernández, Pilar Brufau, Pilar García-Navarro. 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013

[★ Descargar PDF](#)

Período de integración del controlador	Periodo de derivación del controlador	Período de muestreo del controlador
TI	TD	TS
2500	0,1	1000
Velocidad máxima de desplazamiento de compuerta (en S.I.).	Apertura máxima de la compuerta (en S.I.).	Rango de banda muerta mediante el cual se define el margen de no actuación de la compuerta (en S.I.).
v Max	z Max	B.M.
10	2	0,01
Coeficiente de tiempo actual. NOTA: valor entre 0 y 1	Coeficiente de tiempo anterior (t-1). NOTA: valor entre 0 y 1	Coeficiente de tiempo t-2. NOTA: valor entre 0 y 1
k (t)	k (t-1)	k (t-2)
1	0,8	0,6

Figura 2.6.1 Parámetros de regulación PID

En la *Figura 2.6.2* podemos configurar el CFL, cuyo valor óptimo es 0,9 para que el motor de cálculo sea rápido y preciso a la vez, el tiempo final de la simulación, el intervalo de volcado de datos, y la posición de la sonda.

Parámetros de simulación Configura el motor de cálculo

La forma de calcular la evolución de las variables hidrodinámicas existentes es a través del método de Volumenes Finitos acompañado de una integración explícita en el tiempo. Esto requiere de un conjunto de parámetros que configuren los métodos para asegurar la calidad de los resultados así como de elementos propios del caso a simular (dominio temporal, intervalos de reporte...)

Parámetros de cálculo
Configura los parámetros relacionados con el caso y el método numérico

Condición de CFL. El valor ha de estar acotado entre 0 y 1

CFL: 0.0

Tiempo en el que arranca la simulación. Tiempo en segundos

Tiempo Initial: 0

Tiempo Final: 86400

Tiempo final de la simulación. Este tiempo está expresado en segundos

Intervalo de volcado por pantalla. NOTA: Poner un valor muy bajo puede repercutir en la velocidad de la simulación

Inter: Screen: 1000

Intervalo de volcado de Datos. Este valor está expresado en segundos

Inter: Data: 1000

Intervalo de volcado de sondas (si las hay). Este valor está expresado en segundos

Inter: Sondas: 1000

Posición de la sonda de volcado. Esta posición ha de estar en una posición entre 0 y la longitud del tramo

Inter: 1000

Figura 2.6.2 Parámetros numéricos de la simulación

Por último podemos modificar el número de celdas en las que discretizamos el dominio. Es importante que en la primera y en la última celda del dominio no introduzcamos ningún elemento de regulación de caudal (compuertas) ya que estas celdas son conflictivas a la hora de realizar la simulación. También hay que tener en cuenta que cuantas más celdas tengamos más tiempo de cálculo será necesario.

Parámetros computacionales

La configuración de estos parámetros están orientadas a las operaciones que se harán en el servidor de pediatrÍD

Número de celdas en las que discretizar el dominio

Celdas: 900

Figura 2.6.3 Parámetros computacionales de la simulación

3 PASO II: CÁLCULO

Para iniciar el Paso II (Cálculo) hay que pulsar el botón verde Simular del Paso I. Se muestra una pantalla en la que se permite guardar los datos con un subticket o no poner nada y guardar los datos en el nombre del ticket inicial o cargado previamente. Una vez aceptado, la aplicación mostrará un panel resumen de la configuración de la simulación y asignará un código (ticket) a este caso. Después se mostrará una pantalla como la de la *Figura 3.1* donde la aplicación representa caudales en la entrada y la salida a lo largo del tiempo de la simulación así como el paso de tiempo que se calcula de forma dinámica y el error de conservación de la masa. La barra de tiempo transcurrido nos dice el tiempo que lleva y que falta de simulación, cuando la barra de tiempo esta totalmente llena y de color verde indica que ha finalizado la simulación.

Entonces se accede al Paso III (Post-proceso).

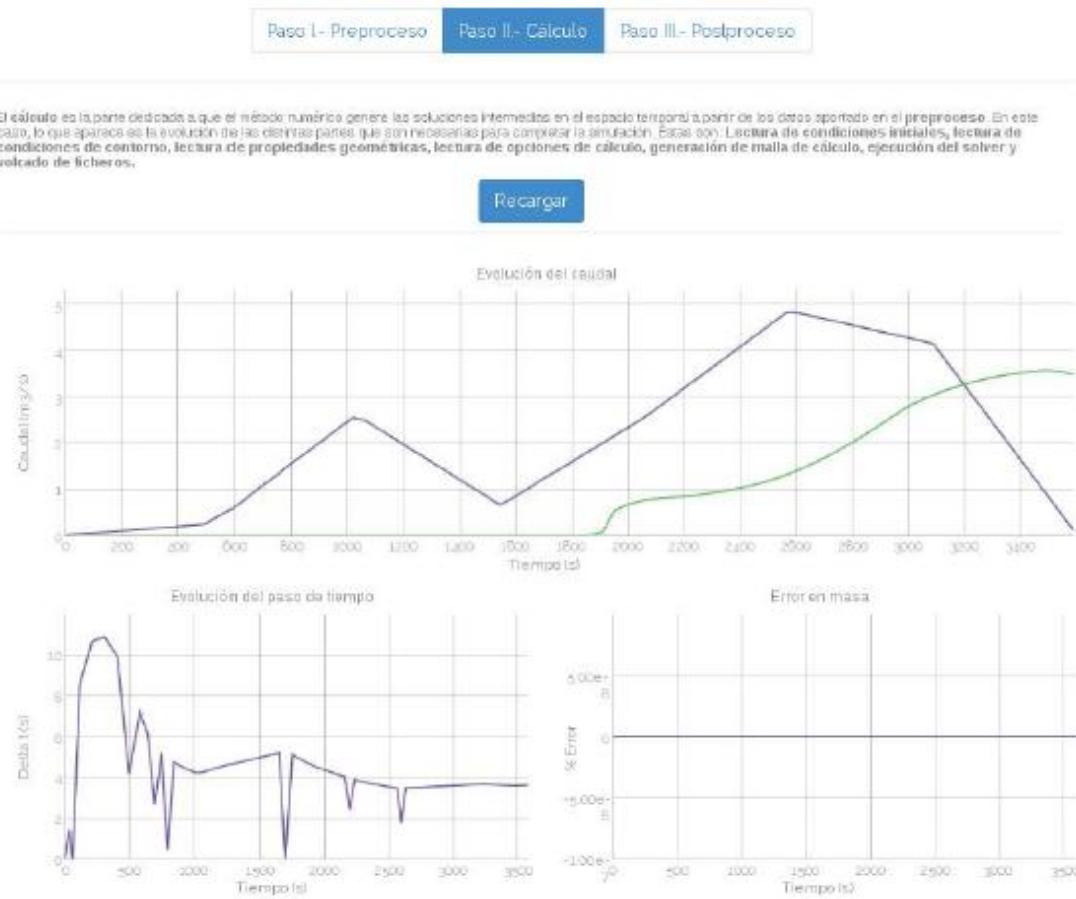


Figura 3.1 Evolución temporal durante el cálculo

4 PASO III: POSTPROCESO

En este menú se muestran los resultados de la simulación:

- Perfiles longitudinales de nivel superficial a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo.
- Perfiles longitudinales de caudal a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo.
- Evolución temporal de apertura y caudal en las compuertas laterales.
- Evolución temporal de apertura, calado calculado y calado objetivo (en caso de ser automáticas) en las compuertas transversales.

En el pre-proceso hemos introducido el dato del periodo de volcado de datos, así pues podremos ir avanzando en la simulación aumentando el tiempo en la celda de arriba a la derecha. Con lo cual podremos ir viendo cómo se modifica el perfil longitudinal de nivel superficial y de caudal a lo largo del canal para cada instante de tiempo.

A su vez, conforme avanzamos en el tiempo en los gráficos de compuertas laterales y compuertas transversales va avanzando una barra amarilla que indica el instante de tiempo en el que nos encontramos.

Para comprobar si la simulación realizada es correcta puede ser un buen punto de partida visualizar si las compuertas laterales extraen el caudal que deseamos. Si esto se cumple podremos analizar el comportamiento de las compuertas transversales, intentando mejorarlo modificando los parámetros del controlador PID. Por último podremos analizar los perfiles longitudinales y el caudal de entrada y salida para cerciorarnos de que todo es como deseamos. Todo esto se muestra en la *Figura 4.1*.

Por último, es importante destacar que los resultados se pueden descargar a ficheros externos mediante el botón "Descargar resultados" situado arriba a la izquierda. Esto es interesante para poder observar numéricamente lo ocurrido y a su vez poder tratar los datos con "Excel".

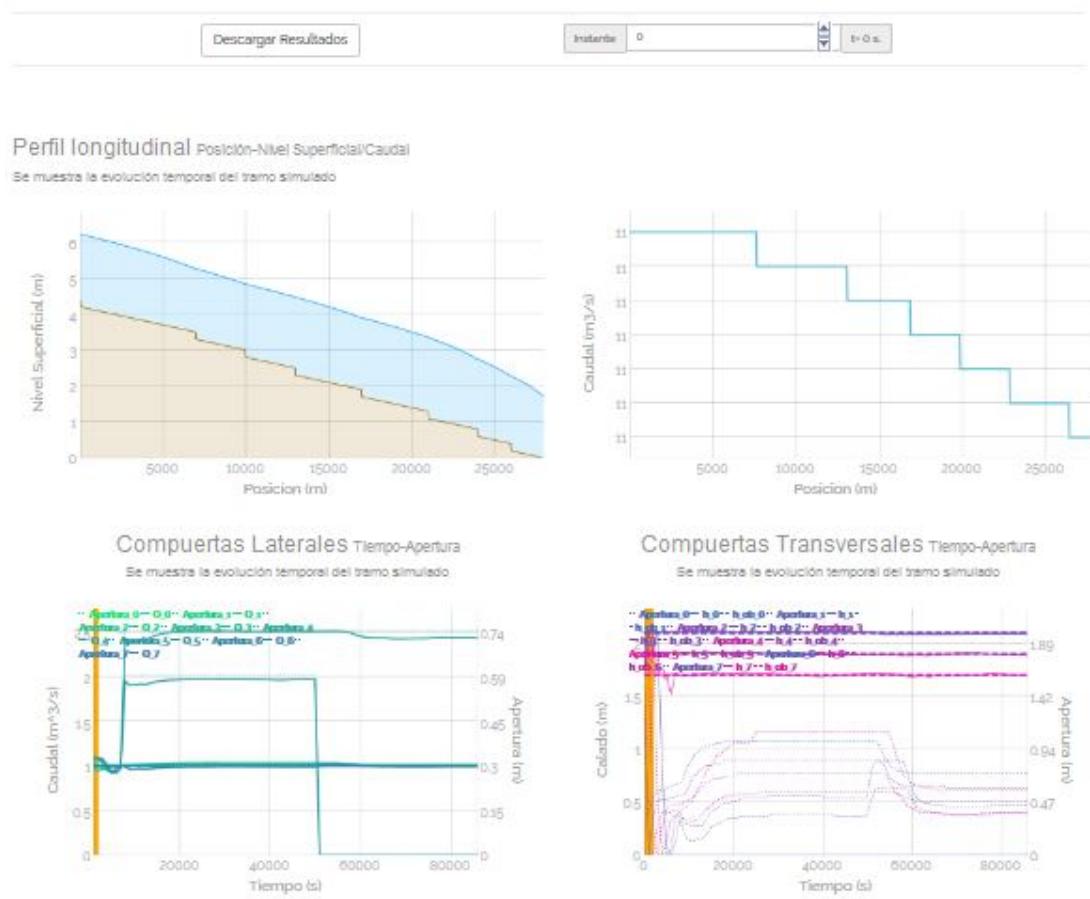


Figura 4.1 Resultados de la simulación

ANEXO II Resultados numéricos de las simulaciones computacionales

INTRODUCCIÓN

En este Anexo se presentan todas las simulaciones realizadas para conseguir calibrar y validar la herramienta de simulación numérica Canalfowmodel cuyo objetivo principal es la gestión de compuertas en redes de riego de canales. Para ello se han diseñado casos test sencillos en un principio y se van añadiendo elementos de control cada vez más complejos analizando la sensibilidad de los parámetros de simulación. Como caso final ejemplo de complejidad se simula un caso real en el canal de riego de Pina de Ebro. Los casos test que se han diseñado con este fin son los siguientes:

- Canal recto de sección transversal rectangular con poca pendiente, partiendo de un caudal constante y entrando un caudal constante se simula un estacionario.
- Usando el caso anterior como caso de partida se introduce como condición de contorno de entrada un hidrograma triangular de caudal y se observa cómo se propaga éste a lo largo del canal.
- A continuación cambiamos la sección transversal del canal a una trapezoidal e introducimos una compuerta transversal en el punto medio del canal. Se analizan diferentes condiciones de contorno de entrada: hidrogramas triangulares de caudal de diferente amplitud e intensidad. Se analizan en todos los casos los parámetros de regulación del control PID de la compuerta para establecer unos rangos y unos valores óptimos de funcionamiento.
- Con la misma base que el caso anterior se introduce una segunda compuerta transversal y se realiza un estudio de sensibilidad de parámetros del controlador PID.
- Posteriormente, partiendo del caso anterior canal recto de sección trapezoidal con dos compuertas transversales, se introduce una toma lateral y se vuelven a analizar los parámetros de ajuste del controlador.
- Una vez comprobado que el regulador actúa correctamente con todos los elementos introducidos (compuertas transversales y tomas laterales), se calibra la herramienta computacional con dos casos test de la literatura [Clemmens, 1998] diseñados por el comité ASCE (American Society of Civil Engineers) de Algoritmos de Automatización de Canales para estandarizar casos con propiedades bien estudiadas que pudieran servir de comparación de algoritmos de control.

- Por último se ha simulado un caso real: el canal de Pina de Ebro que consta de 12 km de longitud, sección recta, pendiente variable, con cuatro compuertas transversales y 19 tomas laterales.

El programa de simulación Canalfowmodel requiere de datos tanto hidráulicos como numéricos y unas especificaciones para el control.

Los datos se pueden dividir en cinco grupos:

- *Geometría del canal*: Donde definimos tanto la longitud como la forma y dimensiones de la sección del canal.
- *Condiciones iniciales para el canal*: Es el estado en el que se encuentra el canal antes de empezar la simulación.
- *Condiciones de contorno*: definen las condiciones que se dan en los extremos del canal (entrada y salida).
- *Control de compuertas*: Parámetros que configuran los elementos de regulación de las compuertas y tomas laterales. Por un lado se especifican y caracterizan los elementos de regulación del flujo existentes en el canal, y por otro lado, se configuran los parámetros del regulador PID.
- *Parámetros de simulación*: Valores necesarios para el motor de cálculo de nuestra herramienta de simulación relacionados con los métodos numéricos que resuelven el sistema de ecuaciones que configura el flujo en canales.

Una vez realizada la simulación, el programa genera toda la información de la evolución del sistema en el espacio y en el tiempo. Esta información se puede descargar en ficheros para poder procesar los resultados numéricos obtenidos. Los ficheros contienen la siguiente información: datos de las variables de interés (caudal, nivel superficial, cota...) en todos los puntos del canal en un instante de tiempo. A priori, como parámetros de la simulación, se establece el intervalo de volcado de resultados numéricos a fichero y por tanto habrá tantos ficheros de este tipo como instantes de tiempo hayamos dicho en el intervalo de volcado. Por otro lado, en otro fichero se presenta la evolución temporal de los desplazamientos de la compuerta y del nivel superficial de agua en el canal.

En el *Anexo 1: Canalfowmodel* se presenta un tutorial donde se explica con detenimiento el manejo del programa utilizado para realizar las simulaciones.

TESTS ACADÉMICOS

Como punto de partida se presentan una serie de casos sencillos donde se conoce a priori la solución. Estos primeros casos sirven para comenzar a interactuar con la herramienta de simulación Canalfowmodel, donde partimos desde la realización de un estacionario (caso 1) hasta un canal con dos compuertas transversales y una toma lateral (caso 5).

1 CASO 1: CANAL RECTO DE SECCIÓN RECTANGULAR Y CAUDAL DE ENTRADA CONSTANTE

En este primer caso se va a simular un canal con una geometría sencilla y poca pendiente, como condición de contorno de entrada se impone un caudal constante. Podremos observar cómo evoluciona la lámina de agua en el canal hasta llegar al estacionario. La simulación tiene una duración de 12 h. Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalfowmodel.net/:caso1estacionario>.

A continuación se detalla la geometría utilizada para esta simulación.

1.1 GEOMETRÍA

Se presenta un canal recto de 10 km de longitud de pendiente 1/100000 (ver *Figura 1.1.1* y *Tabla 1.1*) de sección transversal rectangular de anchura 100 m y altura 10 m (ver *Figura 1.1.2*).

El canal está excavado en tierra, es recto y uniforme. Con estos datos es necesario concretar un coeficiente de rozamiento de Manning [Chow 1959]. En el canal tenemos gravas, la sección es uniforme, el canal es recto y está limpio. Con estos condicionantes tenemos una horquilla para elegir el rozamiento entre 0,022 s/m^{1/3} y 0,030 s/m^{1/3}, habiendo escogido finalmente 0,026 s/m^{1/3}.

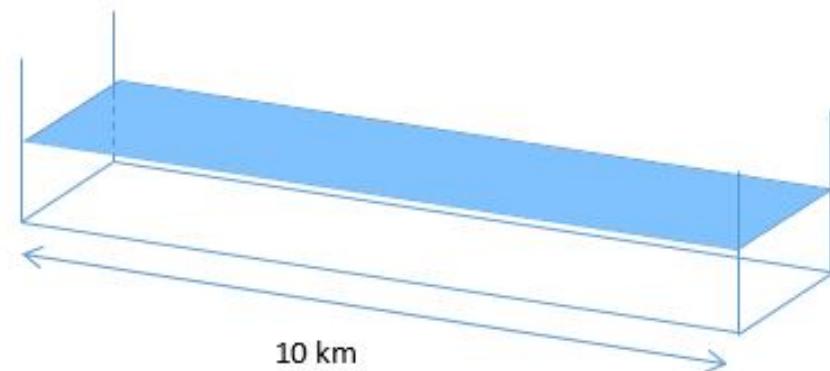


Figura 1.1.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 1

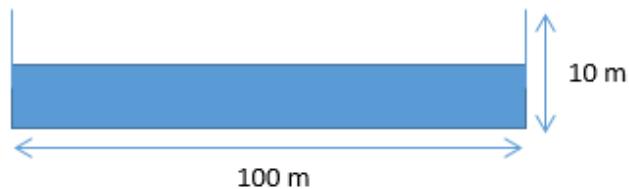


Figura 1.1.2 Sección transversal del canal del caso 1

Los datos geométricos del canal se resumen en la *Tabla 1.1*.

Longitud (m)	10.000
Coeficiente de Manning (s/m^{1/3})	0,026
Ángulo de inclinación (m/m)	0,00001

Tabla 1.1 Datos geométricos del caso 1

1.2 CONDICIONES INICIALES

Como condición inicial de partida de la simulación tenemos un caudal constante de 500 m³/s.

Estado inicial	$Q_{\text{CONSTANTE}}=500 \text{ m}^3/\text{s}$
-----------------------	---

Tabla 1.2 Estado inicial del caso 1

1.3 CONDICIONES DE CONTORNO

- Condiciones de entrada

El caudal de entrada impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 1.3* y responde a un hidrograma de caudal constante de 500 m³/s.

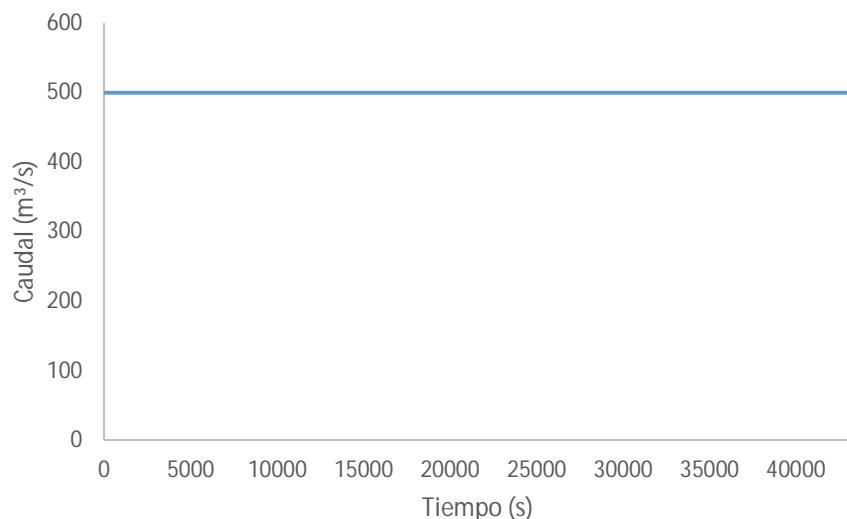


Figura 1.3 Hidrograma de entrada del caso 1

- Condiciones de salida

Como condición de contorno a la salida del canal se impone un número de Froude de 0,05 como se indica en la *Tabla 1.3* para asegurar una salida subcrítica de flujo.

Froude	0,05
---------------	------

Tabla 1.3 Condición de salida del caso 1

1.4 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN

En la *Figura 1.4* podemos observar como el caudal con el que partimos como condición inicial se mantiene constante a lo largo de todo el canal y de todos los instantes de la simulación, debido a que el hidrograma de entrada proporciona un caudal constante de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

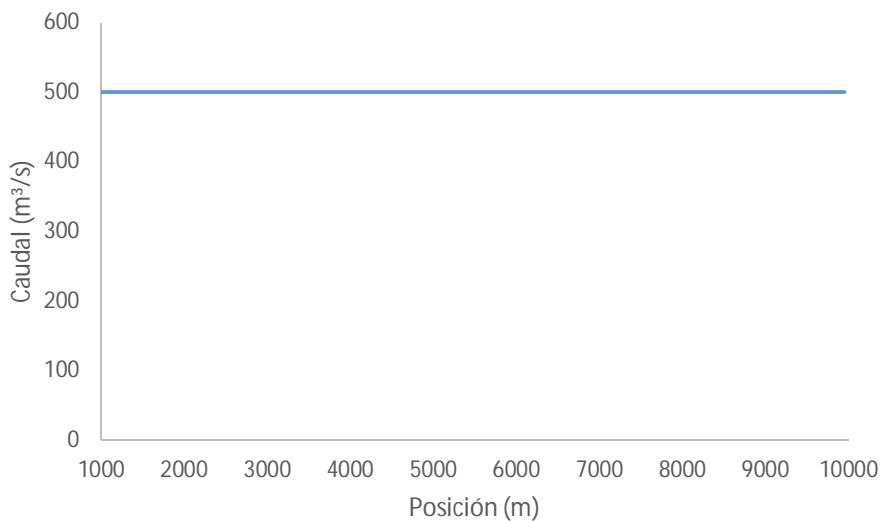


Figura 1.4 Caudal a lo largo del canal en $T=12 \text{ h}$ en el caso 1

Condicionado por la *Figura 1.4* ocurre lo mismo a la hora de representar el nivel superficial a lo largo del canal en $T=12 \text{ h}$, que como se puede observar en la *Figura 1.5* en color azul, se mantiene constante y lo mismo ocurre en todos los instantes de la simulación. La cota del fondo del canal representada en la *Figura 1.5* en color naranja nos muestra la pendiente del canal, donde podemos ver que es muy suave.

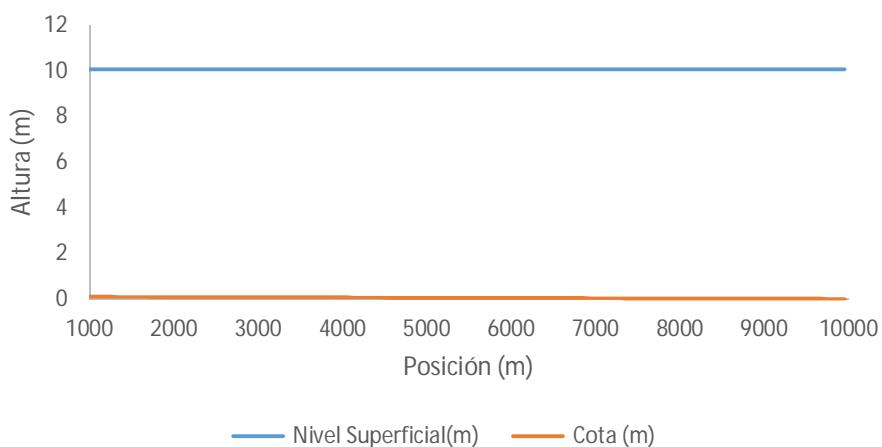


Figura 1.5 Nivel Superficial (azul) y cota del fondo (naranja) a lo largo del canal en $T=12 \text{ h}$ en el caso 1

2 CASO 2: EVOLUCIÓN DEL HIDROGRAMA TRIANGULAR DE CAUDAL DE ENTRADA DE UN CANAL RECTO DE SECCIÓN RECTANGULAR

En este segundo caso se va a simular la evolución temporal de un hidrograma de caudal con forma triangular impuesto en la entrada a lo largo de un canal con la misma geometría que el caso anterior.

La diferencia principal de este caso con el anterior consiste en que en lugar de introducir un caudal constante en la entrada se impone un hidrograma triangular. Se quiere observar como varía el caudal y el nivel superficial a lo largo del canal en los diferentes instantes de tiempo y cómo se propaga la onda generada por el hidrograma triangular de entrada de caudal para finalmente volver a recuperar el estado estacionario inicial. La simulación tiene una duración de 12 h. Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: *caso2transitorio*.

A continuación se detalla la geometría utilizada para esta simulación.

2.1 GEOMETRÍA

Se presenta un canal de las mismas dimensiones y características que el presentado en el caso 1 (ver *Figura 1.1.1*, *Figura 1.1.2* y *Tabla 2.1*).

Los datos geométricos del canal se resumen en la *Tabla 2.1*.

Longitud (m)	10.000
Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)	0,026
Ángulo de inclinación (m/m)	0,00001

Tabla 2.1 Datos geométricos del caso 2

2.2 CONDICIONES INICIALES

Como condición inicial de partida de la simulación tenemos un estado estacionario de caudal constante de 500 m^3/s .

Estado inicial	$Q_{CONSTANTE}=500\ m^3/s$
----------------	----------------------------

Tabla 2.2 Estado inicial del caso 2

2.3 CONDICIONES DE CONTORNO

- Condiciones de entrada

El caudal de entrada impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 2.3* y responde a un hidrograma triangular de caudal, donde se parte de caudal inicial de 500 m³/s, transcurridas 2 h se alcanza el pico de caudal con un caudal de 600 m³/s. En otras 2 h se vuelve a los 500 m³/s y se mantiene constante en este valor hasta el final de la simulación para alcanzar el estacionario.

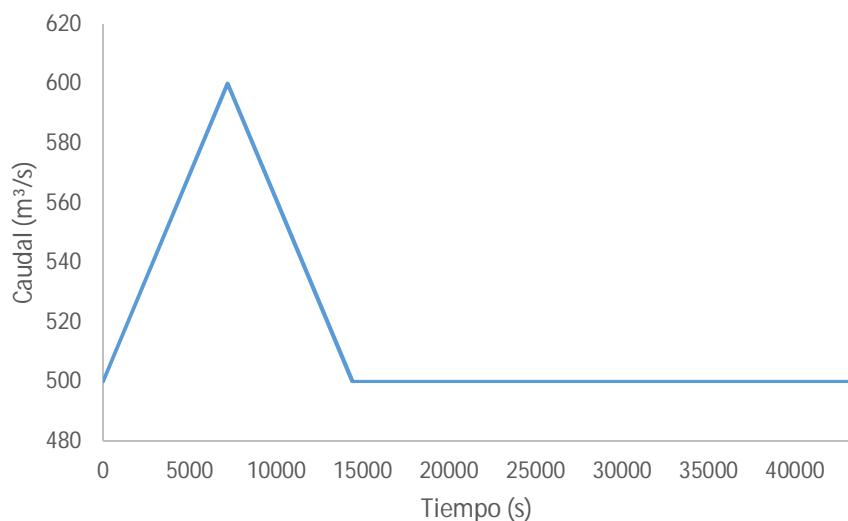


Figura 2.3 Hidrograma triangular de caudal de entrada del caso 2

- Condiciones de salida

Como condición de contorno a la salida se impone salida libre, de forma que el flujo no tiene ninguna restricción a la salida y sale libremente.

Condición de salida	Libre
Tabla 2.3 Condición de contorno de salida del caso 2	

2.4 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN

En la *Figura 2.4.1* podemos observar la evolución temporal del caudal de entrada (azul) y el caudal de salida (naranja). El caudal de entrada corresponde con el hidrograma triangular impuesto como condición de contorno de entrada ya mostrado en la *Figura 2.3*. Podemos ver cómo el caudal de salida mantiene una geometría similar al caudal de entrada, pero con dos diferencias. El caudal de salida tiene el pico más bajo y más ancho; esto es debido a que la onda de entrada se propaga a través del canal que posee pendiente de fondo y pérdidas por rozamiento. Si analizamos el volumen de las dos figuras veríamos que es el mismo; lo cual quiere decir que no se está ganando ni perdiendo masa de agua; el volumen de agua en el canal se conserva. Esto nos da idea de que el método numérico, base de la herramienta de cálculo que usamos, es correcto. También observamos que existe un desfase temporal entre los dos hidrogramas. Evidentemente, el agua necesita un tiempo para recorrer toda la longitud del canal (aproximadamente unos 4.000 s).

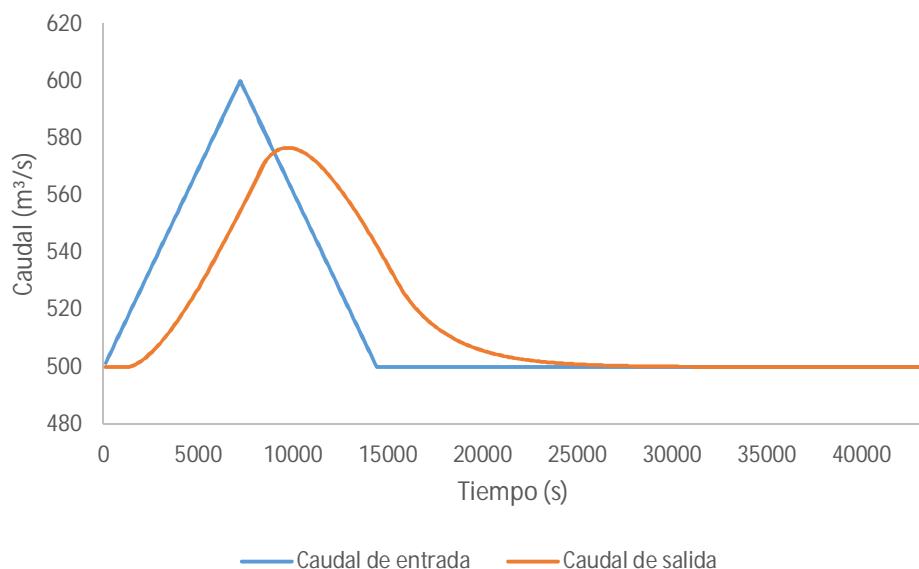


Figura 2.4.1 Evolución temporal de los hidrogramas de caudal de entrada (azul) y salida (naranja) del caso 2

En la *Figura 2.4.2* se representa cómo se encuentra la lámina de agua a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo. Se puede observar como dependiendo del caudal de entrada varía el nivel superficial en las distintas posiciones del canal y para distintos tiempos. Para $T=0$ s y $T=43.100$ s tenemos el mismo nivel superficial dado que estos tiempos corresponden a las condiciones iniciales y finales de la simulación respectivamente que coinciden con los estacionarios. En $T=7.200$ s y en $T=14.400$ s se puede observar como el pico de caudal introducido varía el nivel superficial del canal haciéndolo aumentar.

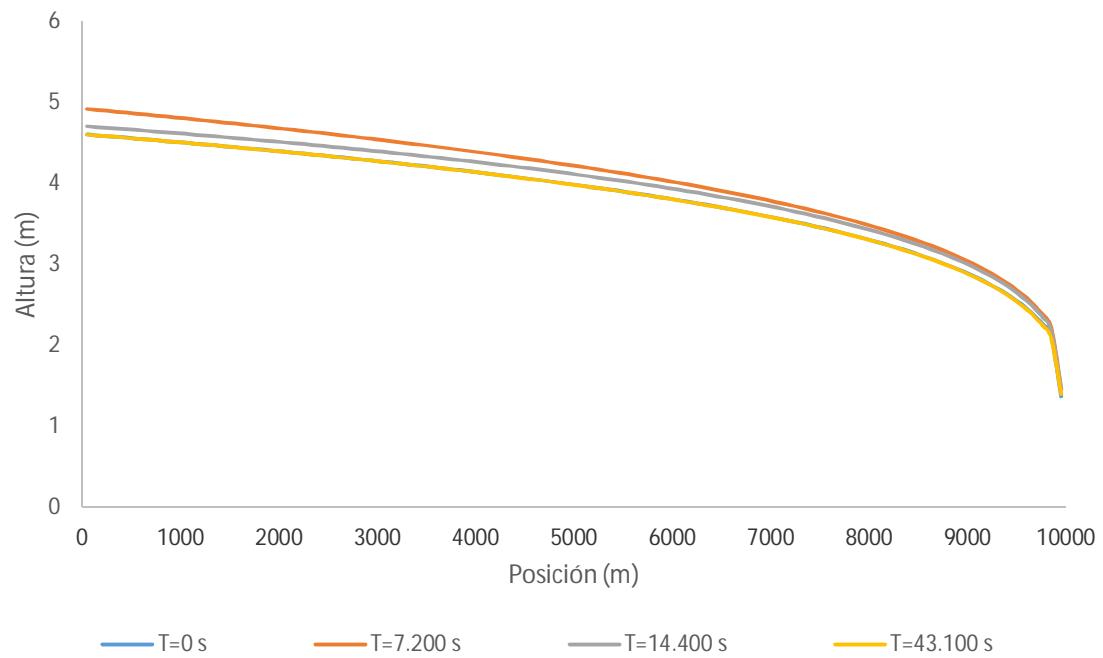


Figura 2.4.2 Nivel superficial a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo del caso 2

3 CASO 3: CONTROL AGUAS ARRIBA DE UNA COMPUERTA TRANSVERSAL EN UN CANAL RECTO DE SECCIÓN TRAPEZOIDAL

En este tercer caso se simula el control del flujo de agua en un tramo de canal manteniendo constante el nivel aguas arriba de la compuerta de regulación. Este sistema de regulación está orientado al aporte de agua, puesto que responderá de forma adecuada ante variaciones de caudal que se puedan producir aguas arriba.

Esto se va a realizar modificando el caudal aguas arriba mediante un hidrograma triangular como condición de contorno de entrada (igual que en el caso 2), el cual suministrará un caudal constante la mayor parte de la simulación excepto entre 20.000 y 25.000 s donde aportará un pico de caudal. Lo que se espera obtener es que la compuerta sea capaz de regular su apertura para conseguir un nivel de altura de agua constante de 3,5 m en todo el canal.

Para poder conseguir el objetivo de regulación de agua en el canal se ha colocado una compuerta transversal. El sistema de control instalado debe manipular el elemento regulador para mantener la lámina de agua pivotando sobre el extremo aguas abajo del tramo. Aunque varíe el caudal aguas arriba – por ejemplo por la apertura del embalse para suministrar agua, o una extracción lateral de caudal, que disminuya el caudal del flujo – el control sobre la compuerta deberá ser capaz de mantener el nivel aguas arriba de la misma constante, e igual al valor objetivo fijado.

Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalfowmodel.net/>: *caso3unacompuerta*.

A continuación se detallan los datos utilizados en la simulación.

3.1 GEOMETRÍA

Se va a simular un canal de longitud 5.000 m (ver *Figura 3.1.1* y *Tabla 3.1*), y sección transversal trapezoidal de anchura en la base 4 m, profundidad 4,8 m y pendiente lateral de 1,6 m/m. (ver *Figura 3.1.2*). El canal a lo largo de toda su longitud también posee una pendiente constante de 0,00015 m/m. Se mantiene el coeficiente de Manning de 0,026 s/m^{1/3}.

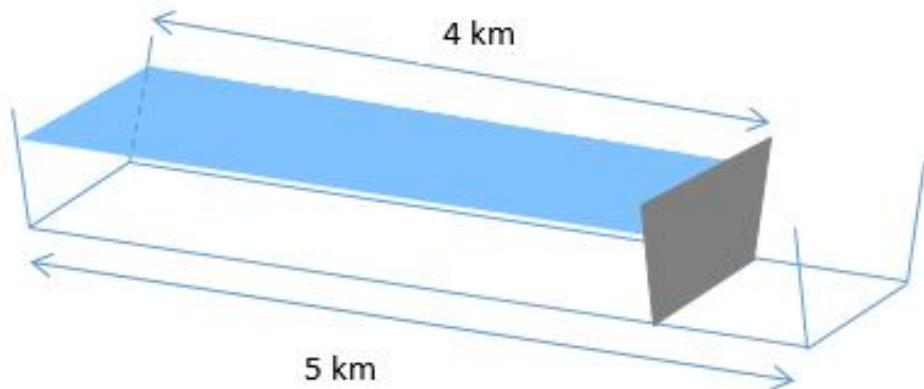


Figura 3.1.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 3

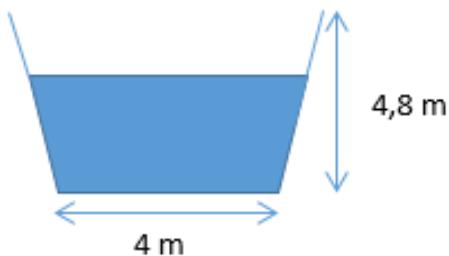


Figura 3.1.1 Sección transversal del canal del caso 3

Longitud (m)	5.000
Coeficiente de Manning (s/m^{1/3})	0,026
Ángulo de inclinación (m/m)	0,00015

Tabla 3.1 Datos geométricos del caso 3

3.2 CONDICIONES INICIALES

Como condiciones iniciales de partida de la simulación se han elegido las de lecho seco, es decir se va a partir de un caso en el que se supone que no hay agua en el canal.

Estado inicial	Seco
-----------------------	------

Tabla 3.2 Estado inicial del caso 3

3.3 CONDICIONES DE CONTORNO

- Condiciones de entrada

El caudal de entrada impuesto como condición de contorno es el representado en la *Figura 3.3* y responde a un hidrograma triangular que pasa de 20 a 30 m³/s transcurridos 20.000 s desde el inicio de la simulación. En un tiempo de 2.500 s alcanza los 30 m³/s y posteriormente vuelve a un caudal de 20 m³/s en el mismo periodo de tiempo, manteniéndose constante hasta el final de la simulación. Se efectúa esta perturbación para comprobar la respuesta del control aguas arriba a variaciones en el caudal de entrada.

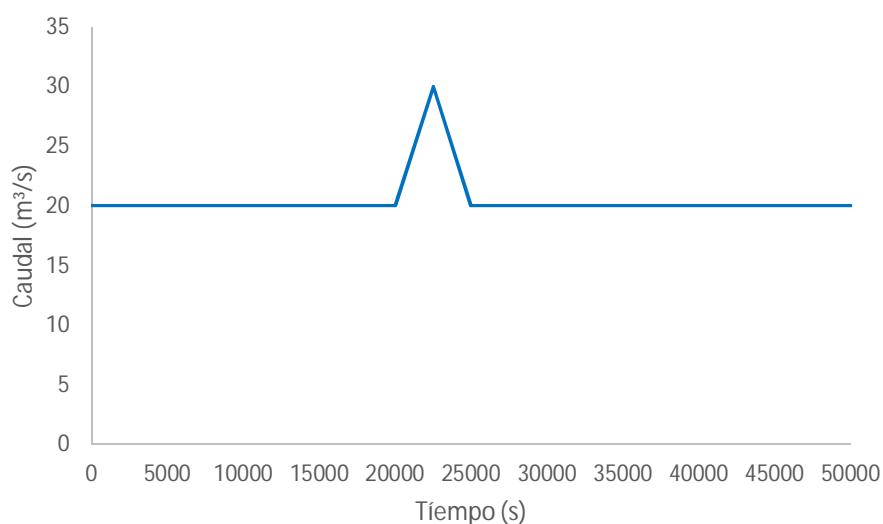


Figura 3.2 Hidrograma de entrada de caudal del caso 3

- Condiciones de salida

Como condición de contorno a la salida se impone un número de Froude de 0,6 como se indica en la *Tabla 3.3* para asegurar una salida subcrítica de flujo.

Froude	0,6
<i>Tabla 3.3 Condición de salida de flujo del caso 3</i>	

3.4 COMPUERTA

En este caso se coloca una compuerta de regulación automática transversal al canal, a una distancia de 4.000 m (ver *Figura 3.1.1*). La altura objetivo es de 3,5 m, la cual debemos conseguir con la auto-regulación de la compuerta en función del caudal. El coeficiente K es una constante relacionada con las pérdidas debido a la inexactitud de la geometría. Se introduce este coeficiente porque las compuertas no tienen una geometría rectangular exacta.

Todo esto se resume en la *Tabla 3.4*.

Número de compuerta	1
Posición (m)	4.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	3,5

Tabla 3.4 Compuerta transversal de regulación automática del caso 3

3.5 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL

El controlador PID encargado de la automatización de la compuerta necesita una serie de parámetros para que la simulación salga lo más precisa y optimizada posible.

En la *Tabla 3.5* se muestran los parámetros utilizados para esta simulación.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 3.5 Parámetros de regulación del controlador PID de la compuerta transversal del caso 3

3.6 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN

En la *Figura 3.6.1* se representa la evolución temporal de tres variables: la apertura de la compuerta en azul, el nivel superficial del agua que se obtiene en una posición del canal justo antes de la compuerta en naranja y la altura objetivo que se pretende en gris.

Estamos buscando un nivel objetivo en el canal de 3,5 m. Esto lo debemos de conseguir a través de la auto-regulación de la compuerta. Como se puede observar en la *Figura 3.6.1*, el canal comienza seco, por lo tanto la compuerta permanece cerrada. Conforme va pasando el tiempo, el agua va avanzando por el canal hasta llegar a la compuerta.

Aproximadamente sobre los 5000 s (1 h 28 mins) la altura de todo el canal es de 3,5 m, por lo tanto la compuerta comienza a abrirse para dejar paso al caudal sobrante y así mantener la altura objetivo en todo el canal.

El movimiento de la compuerta se estabiliza y la apertura permanece constante (0,94 m) desde los 10.000 s hasta los 20.000 s ya que el caudal es constante.

En el instante $T=20.000$ s se introduce una onda de caudal aguas arriba en forma de hidrograma como se indica en la condición de contorno de entrada (ver *Figura 3.3*). El grado de apertura de la compuerta debe adecuarse ante este aumento de caudal. El nivel lógicamente aumenta, luego la compuerta se abre para compensar este incremento y mantenerse lo más próximo posible al nivel objetivo. Posteriormente, la compuerta aumenta su apertura hasta llegar a los 2 m en 24.000 s y se va cerrando hasta volver a alcanzar los 0,94 m en 30.000 s. Desde aquí hasta el final de la simulación la compuerta permanece inamovible ya que tenemos un caudal constante de 20 m³/s, con lo que se alcanza de nuevo el estado estacionario.

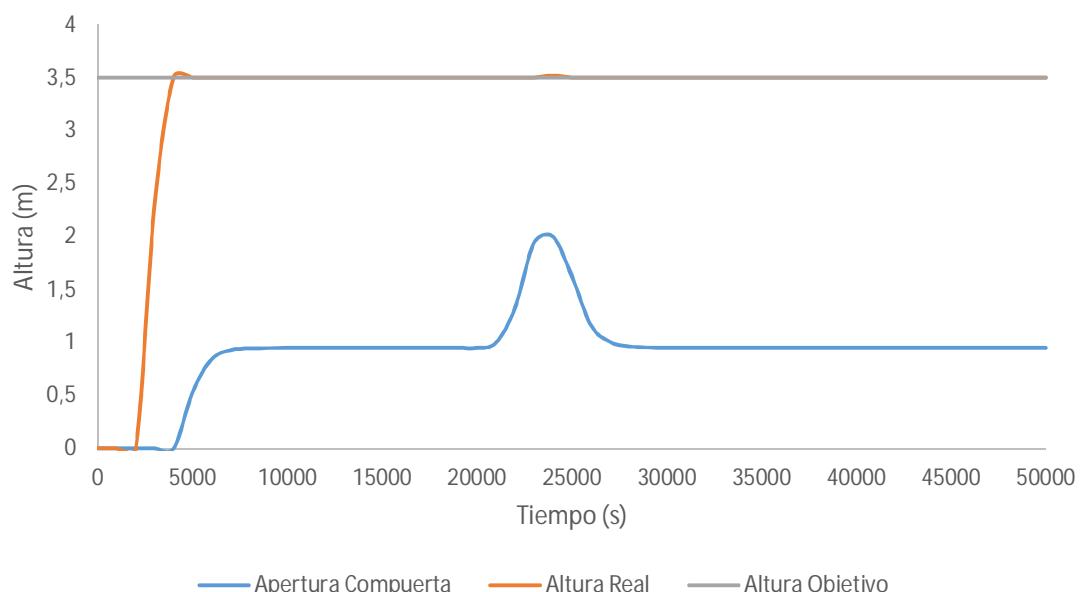


Figura 3.6.1 Evolución temporal de la apertura de la compuerta (azul), nivel superficial de agua (naranja) y altura objetivo (gris) del caso 3

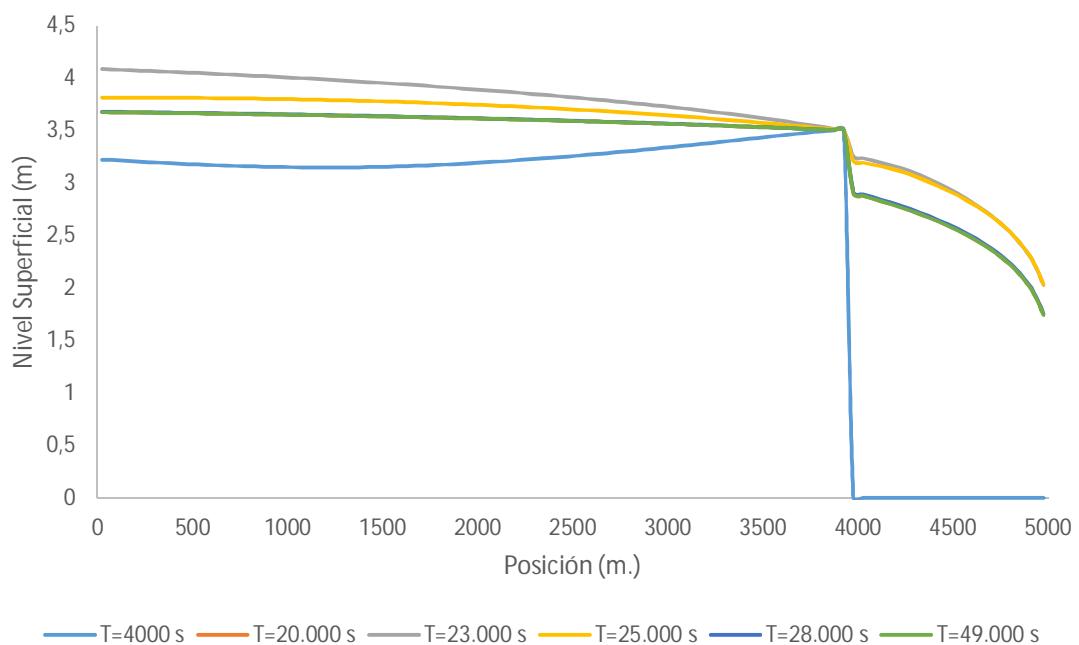
En la *Figura 3.6.2* se representa un perfil del calado o nivel superficial a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo. La lámina evoluciona en torno a un nivel aproximadamente constante e igual a 3,5 m.

En un tiempo corto ($T=4.000$ s) la situación inicial se ve distorsionada debido a la inconsistencia de partida entre el nivel de agua inicial y el nivel objetivo establecido en la compuerta, ya que el canal aún no ha alcanzado la altura objetivo y por lo tanto la compuerta permanece cerrada.

Al introducir la onda de caudal, todo el tramo experimenta un ascenso del nivel de agua, que se aprecia en la curva a tiempo 23.000 s.

Posteriormente se adecua el movimiento de la compuerta y el calado vuelve a disminuir, llegando de nuevo a una situación prácticamente idéntica a antes de la variación de caudal de entrada.

Se puede observar que la lámina de agua cuando el tiempo es de 10.000 s y cuando es 49.000 s es prácticamente la misma en todo el tramo del canal, esto es debido a que ha alcanzado el estacionario.



En la *Figura 3.6.3* se representa la evolución temporal del caudal: en azul el hidrograma de entrada y en naranja el caudal en la sección de salida.

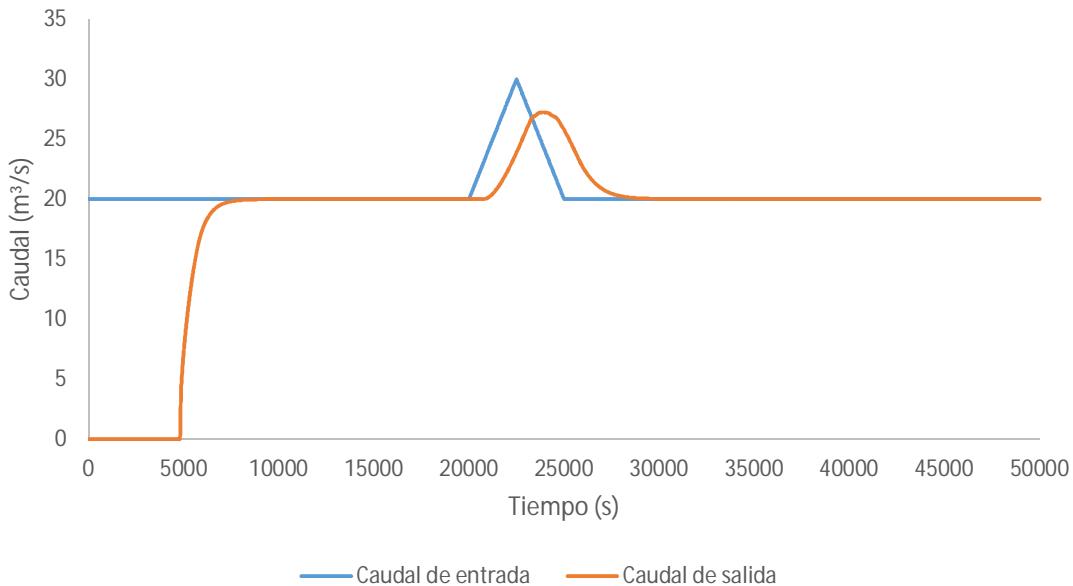


Figura 3.6.3 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del caso 3

Por último, en la *Figura 3.6.4* se representa el perfil del caudal a lo largo del canal para diferentes instantes de tiempo. Las líneas que reflejan los caudales para 20.000, 28.000 y 49.000 s corresponden al estacionario, permitiendo mantener un caudal constante e igual a 20 m³/s. La línea que muestra el caudal a los 4.000 s nos muestra que el canal aún no está totalmente lleno, pero que el agua va transcurriendo por él. Las otras dos líneas de 23.000 y 25.000 s muestran el pico de caudal que llega desde el hidrograma de entrada.

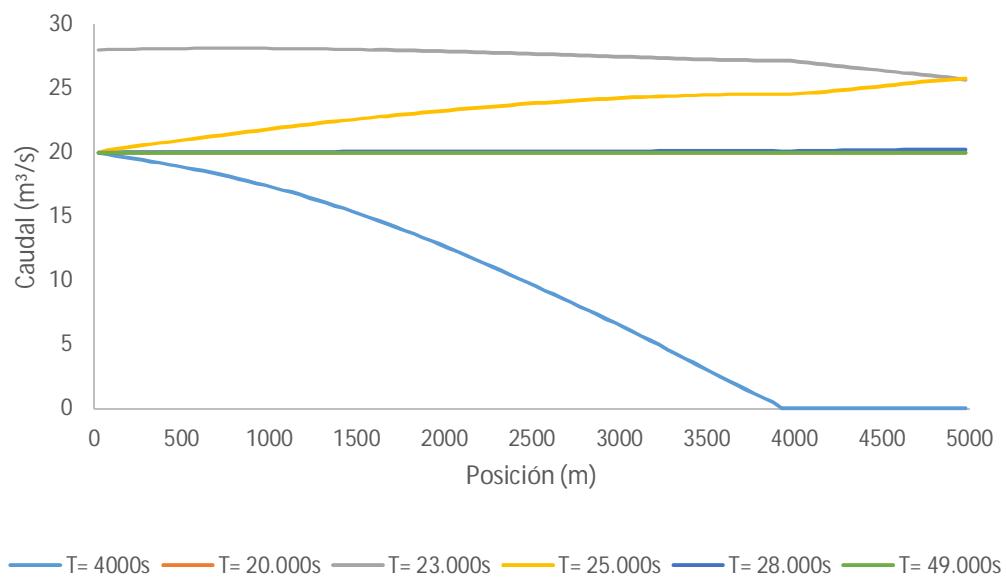


Figura 3.6.4 Caudales a lo largo del canal en distintos instantes de tiempo del caso 3

3.7 INFLUENCIA DE LA PERTURBACIÓN

El sistema de control ha de responder ante las perturbaciones, sean del tamaño que sean. En este apartado se introducen diversos hidrogramas a la entrada con la misma forma pero con diferentes picos y amplitudes y se observa la respuesta del método de control. Por un lado se va a estudiar lo que ocurre al variar el pico de caudal introducido en la entrada y por otro lado lo que ocurre si el pico de caudal se mantiene constante y se varía la anchura del hidrograma; es decir, pensando en situaciones en las que la perturbación entra durante más o menos tiempo.

Cuanto mayor es el tamaño de la perturbación, en términos de caudal, la compuerta tiene que abrirse más para lograr que ese aumento de caudal viaje aguas abajo y el nivel aguas arriba de la compuerta no aumente.

En la *Figura 3.7.1* se muestra la evolución de la apertura de la compuerta para los casos de caudal de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (rojo), $27,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (azul) y $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (verde) a lo largo de todo el dominio temporal.

Los hidrogramas introducidos son iguales, en forma triangular y de la misma amplitud de tiempo que el introducido en los casos anteriores (ver *Figura 3.3*), simplemente se ha reducido el pico de caudal para observar la respuesta de la compuerta.

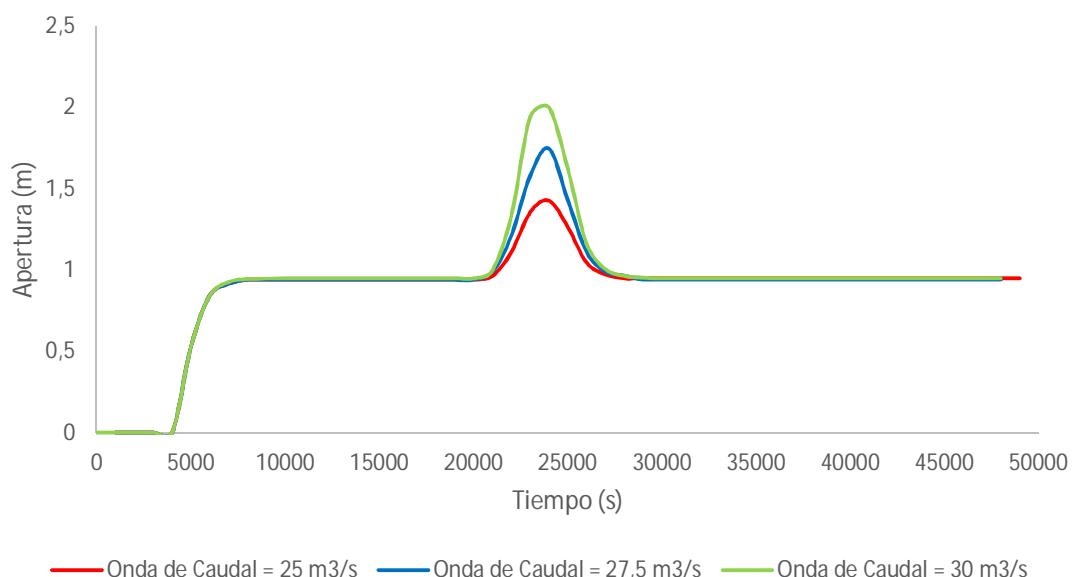
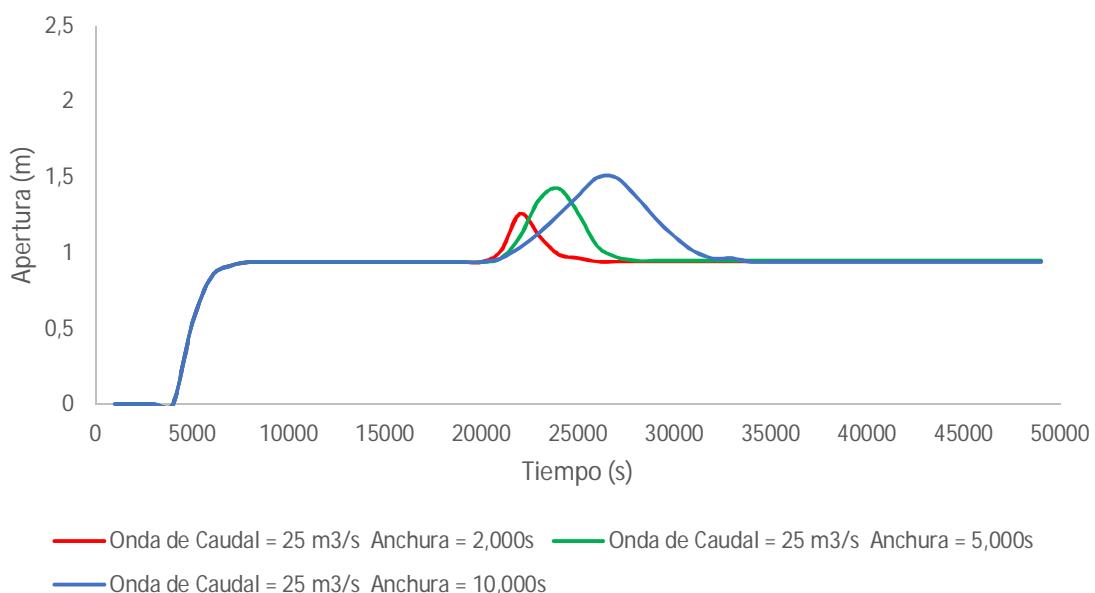


Figura 3.7.1 Evolución temporal de la apertura de la compuerta para distintos picos de caudal del caso 3

Para seguir con el estudio de la influencia de las perturbaciones, se analizó la anchura del hidrograma de entrada. En esta simulación se modifica la duración de la perturbación para comprobar si el sistema responde también ante este tipo de perturbaciones.

Se ha analizado la respuesta del algoritmo de control con un pico de caudal de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ que entra durante 2.000, 5.000 y 10.000 s.

En la *Figura 3.7.2* se representa la evolución temporal de la apertura de la compuerta en los tres casos mencionados anteriormente. Obviamente el máximo en la apertura de la compuerta y por lo tanto en el nivel se produce antes conforme la anchura de la perturbación es menor. Como el volumen de agua introducido en el canal es menor, la variación de la apertura de la compuerta necesaria para mantener el calado aguas arriba constante es menor como se puede observar en la *Figura 3.7.2* con una anchura de onda de caudal de 2.000 s (rojo). Para los picos de caudal de 5.000 s (verde) y de 10.000 s (azul) vemos como el regulador actúa correctamente aumentando en medida y en tiempo la apertura de la compuerta para así seguir manteniendo la altura objetivo deseada.



3.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR PID DE LA COMPUERTA

Dentro de la regulación del controlador PID podemos configurar los parámetros con la regulación del tramo a simular, esto nos permitirá ajustar la simulación. En función de los valores de estos parámetros la simulación nos proporcionará unos resultados más precisos. Este análisis busca el objetivo de conseguir que las compuertas transversales alcancen sus alturas objetivo realizando los mínimos movimientos posibles. Este es un factor clave ya que permite optimizar al máximo los movimientos de las compuertas transversales, por lo tanto permite reducir los consumos para accionarlas, reduce riesgos de problemas mecánicos y reduce el número de ondas tanto aguas arriba como aguas abajo provocadas

por el movimiento de las compuertas. Por lo tanto, a la hora de realizar el análisis ha sido el único factor a tener en cuenta.

Los parámetros a modificar son:

- Periodo de integración del controlador (TI)
- Periodo de derivación del controlador (TD)
- Periodo de muestreo del controlador (TS)
- Banda muerta, donde se define el margen de no actuación de la compuerta (BM)

En este caso se ha realizado un ensayo modificando todos los valores anteriores barriendo todo su rango de posibilidades. Los resultados que se han obtenido han sido los siguientes:

Periodo de integración del controlador (TI)

El periodo de integración utilizado en este caso verifica que

- Para valores inferiores a 1.000 s los valores de la simulación oscilan en exceso.
- Para valores cercanos a 2.500 s la simulación sale correcta.
- Para valores superiores a 3.000 s la simulación cada vez sale más desajustada.

Podríamos utilizar unos valores de TI entre 2.000 s y 2.700 s para obtener unos buenos resultados, siendo 2.500 s el valor óptimo.

Periodo de derivación del controlador (TD)

El periodo de derivación tiene las siguientes propiedades:

- Desde un valor de 0,1 s hasta 40.000 s los resultados son correctos.
- Para valores superiores a 40.000 s la simulación cada vez sale más desajustada.

Es evidente que para este parámetro tenemos un amplio abanico donde elegir y no modificar prácticamente la simulación, se puede decir que este parámetro no tiene casi influencia en los resultados de la simulación.

Periodo de muestreo del controlador (TS)

El periodo de muestreo cumple los siguientes requisitos:

- Nunca valores inferiores a 1 s, ya que distorsiona gravemente la simulación.
- Desde 1 s hasta 1.000 s la simulación va saliendo cada vez mejor.
- Para valores aproximados a 1.000 s la simulación sale correcta.
- Para valores superiores a 1.000 s la simulación cada vez sale más desajustada.

Con lo cual un valor cercano a 1.000 s nos proporciona un buen resultado, siendo 1.000 s el valor óptimo.

Banda muerta (BM)

El valor de BM define el rango de no actuación de la compuerta, esto quiere decir que tenemos una tolerancia a la hora de actuar la compuerta. Este dato es muy importante ya que si definimos una BM muy elevada, la compuerta no actuará para conseguir la altura objetivo ya que tiene un rango de no actuación muy elevado. Por el contrario si definimos un valor muy bajo, la compuerta actuará constantemente con el perjuicio citado anteriormente que esto supone. Con lo cual es importante encontrar un valor medio, donde la compuerta actúe alcanzando las alturas objetivo pero realizando los mínimos movimientos posibles.

- Valores lo más cercanos a 0 m, nunca han de ser superiores a 1 m.
- De 0,01 m a 1 m, conforme aumentamos el valor cada vez sale peor la simulación.
- Con un valor de 0,01 m la simulación ya sale correcta.

Obtenemos un valor óptimo de 0,01 m, si aumentamos este valor puede ser que la compuerta no alcance las alturas objetivo, y si reducimos este valor la compuerta realizará más movimientos para alcanzar la altura objetivo, y esto no nos interesa.

Según el análisis realizado de la sensibilidad de los parámetros de simulación del controlador, los valores óptimos elegidos han sido los que se reflejan en la *Tabla 3.8*.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 3.8 Valores óptimos del regulador PID para el caso 3

En la *Figura 3.8* se muestra un gráfico radial donde se puede observar claramente la sensibilidad de la simulación al modificar un parámetro en concreto.

Vemos que TI y TS se mueven en el mismo orden de magnitud, donde la variación de cualquiera de estos dos parámetros no modifica demasiado la simulación.

Por otro lado TD está un orden de magnitud por encima de los anteriores, la simulación ya muestra cambios más significativos al modificar este parámetro.

Por último BM está cuatro órdenes de magnitud por encima de TD, sin duda alguna este parámetro es el más sensible y con el que hay que tener más cuidado a la hora de manipularlo ya que modifica por completo la simulación.

A priori era fácil de prever este resultado ya que la Banda Muerta define la tolerancia de la compuerta. Si nuestro valor de BM es 0,01 m, y la altura objetivo es 3,5 m, la compuerta sólo actuaría cuando la altura fuera superior a 3,51 m o inferior a 3,49 m. Con lo cual si modificamos la BM y acercamos su valor en demasiado a 0 m, la compuerta estaría constantemente modificando su posición ante pequeñas variaciones, esto no es lo deseado principalmente por el gran desgaste de los componentes mecánicos que realizan el movimiento de ésta, además de los otros problemas citados anteriormente.

Por otro lado, si aumentamos demasiado el valor de BM, vamos a tener una tolerancia muy grande, y la compuerta sólo actuará ante grandes variaciones, con lo que no podríamos alcanzar nuestros objetivos de regulación del canal.

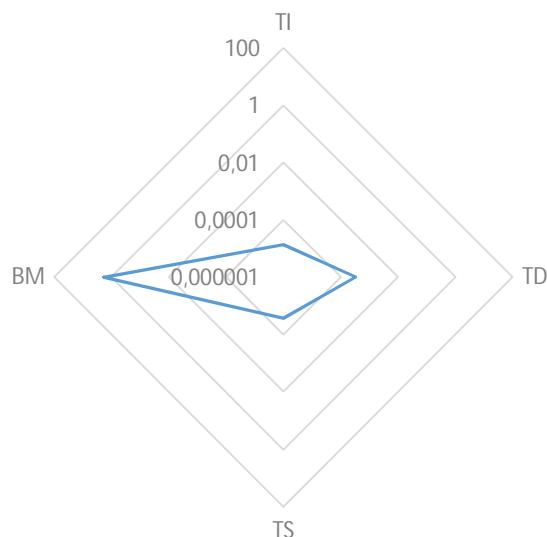


Figura 3.8 Sensibilidad de los parámetros de regulación del controlador PID de una compuerta transversal
(Escala logarítmica)

Hay que tener en cuenta que este análisis es orientativo, es útil para hacernos una idea de los parámetros a modificar y sus consecuencias, pero dependiendo de la simulación y de los datos introducidos, los parámetros óptimos pueden diferir de los aquí dados.

4 CASO 4: CONTROL AGUAS ARRIBA DE DOS COMPUERTAS TRANSVERSALES EN UN CANAL RECTO DE SECCIÓN TRAPEZOIDAL

En este cuarto caso vamos a trabajar sobre un canal con la misma sección transversal que el anterior (ver *Figura 3.1.2*). Supondremos una situación algo más compleja con la presencia de otra compuerta más que, en este caso, divide al canal longitudinalmente en dos tramos (ver *Figura 4.1*).

Nuestro objetivo será tener dos alturas objetivo distintas, es decir, tener una altura antes de la primera compuerta, y otra altura diferente entre las dos compuertas, así conseguiremos tener una cantidad de agua acorde a las necesidades.

A su vez, esta simulación también nos servirá como preámbulo a la siguiente simulación, donde se incluirá una toma lateral.

Los datos utilizados para la simulación son iguales que en el caso anterior excepto el hidrograma de entrada y la colocación de una nueva compuerta.

Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: *caso4doscompuertas*.

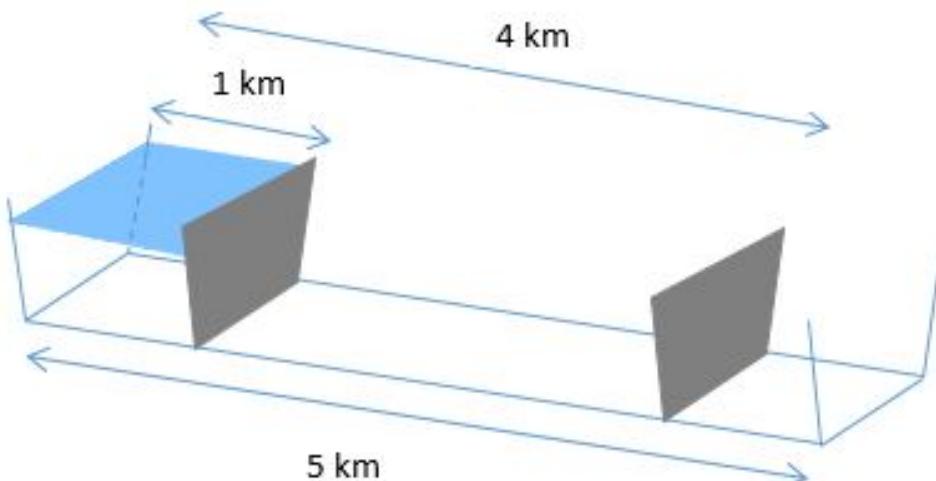


Figura 4.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 4

4.1 GEOMETRÍA

Longitud (m)	5.000
Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)	0,026
Ángulo de inclinación (m/m)	0,00015

Tabla 4.1 Datos geométricos del caso 4

4.2 CONDICIONES INICIALES

Estado inicial	Seco
----------------	------

Tabla 4.2 Estado inicial del caso 4

4.3 CONDICIONES DE CONTORNO

• Condiciones de entrada

El caudal de entrada impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 4.3* y responde a un hidrograma, triangular que pasa de 20 a 25 m³/s transcurridos 20.000 s desde el inicio de la simulación. En un tiempo de 5.000 s alcanza los 30 m³/s y posteriormente vuelve a un caudal de 20 m³/s en el mismo periodo de tiempo, manteniéndose constante hasta el final de la simulación. Se efectúa esta perturbación para comprobar la respuesta del control aguas arriba a variaciones en el caudal de entrada.

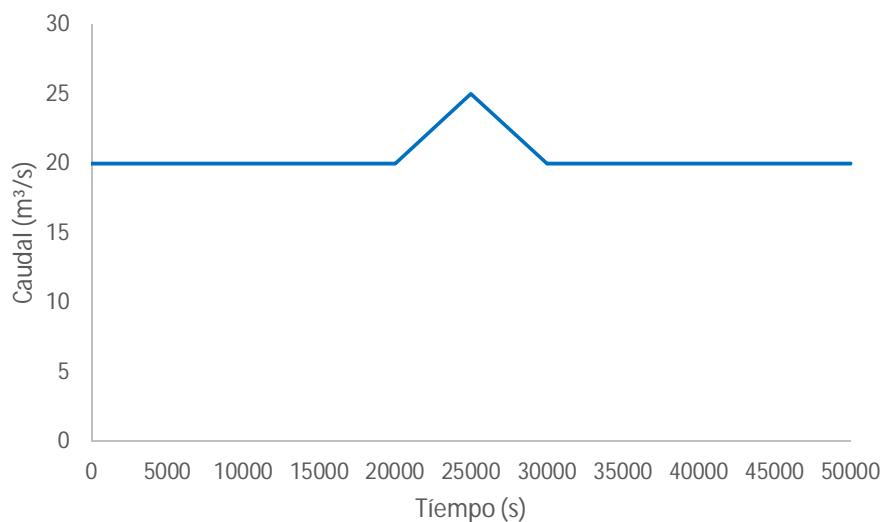


Figura 4.3 Hidrograma de entrada del caso 4

• Condiciones de salida

Froude	0,6
--------	-----

Tabla 4.3 Condición de salida del caso 4

4.4 COMPUERTAS

En este caso se coloca una compuerta transversal al canal de regulación automática, a una distancia de 1.000 m (ver *Figura 4.1*). La altura objetivo es de 4 m, la cual debemos conseguir con la auto-regulación de la compuerta en función del caudal.

Además de esta compuerta tenemos otra compuerta transversal a una distancia de 4.000 m (ver *Figura 4.1*), cuya altura objetivo es de 3,5 m.

Todo esto se resume en la *Tabla 4.4*.

Número de compuerta	1
Posición (m)	1.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	4

Número de compuerta	2
Posición (m)	4.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	3,5

Tabla 4.4 Datos de las compuertas transversales del caso 4

4.5 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL

En este caso se han utilizado los mismos parámetros que en la simulación anterior (caso 3), ya que han resultado ser los óptimos para una compuerta transversal.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 4.5 Parámetros de regulación del controlador PID de las compuertas transversales del caso 4

4.6 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN

En la *Figura 4.6.1* se muestran los resultados de la evolución temporal de ambas compuertas (azul claro y amarillo), la altura objetivo deseada en cada una de las compuertas (gris y verde) y el nivel superficial del agua que se obtiene en una posición del canal justo antes de las compuertas (naranja y azul).

Si observamos el comportamiento de la compuerta 1 (azul claro), esta permanece cerrada debido a que partimos de condiciones de seco, con lo cual el canal tarda un tiempo hasta alcanzar la altura objetivo de 4 m, sobre los 1.500 s (25 min). A partir de aquí la compuerta 1 se va regulando para mantener la altura objetivo, alcanzando el estacionario. A los 20.000 s viene un pico de caudal, como la compuerta se sitúa a tan solo 1.000 m, el pico de caudal llega con celeridad a la compuerta con lo cual ésta realiza una apertura amplia y rápida para dejar paso al pico de caudal y seguir manteniendo la altura objetivo. Una vez pasado el pico de caudal sobre los 30.000 s (8 h y 20 mins) el caudal vuelve a alcanzar el estacionario y por tanto la compuerta permanece inamovible.

Si analizamos el comportamiento de la compuerta 2 (amarillo) vemos que se mantiene cerrada hasta obtener la altura objetivo de 3,5 m sobre los 4.500 s (1 h 15 min), esto es debido a que primero se tiene que alcanzar la altura objetivo en la primera piscina, y una vez alcanzada ésta se abre la compuerta 1 permitiendo el paso del agua hasta alcanzar la altura objetivo en la piscina 2. Por este motivo la compuerta 2 permanece cerrada tanto tiempo, hasta que alcanzamos la altura objetivo y entonces la compuerta comienza a regularse hasta alcanzar la altura objetivo. El caudal alcanza el estacionario y con ello la compuerta conserva su apertura. En el momento del pico de caudal, las ondas que se propagan cuando se ajusta la primera compuerta tardan un mayor tiempo en llegar hasta la compuerta 2, con lo cual los ajustes en la compuerta se hacen notar un tiempo después.

Por este motivo el periodo de recuperación de la perturbación es mayor en la compuerta 2, ya que la compuerta 1 realiza un movimiento más agresivo pero se estabiliza antes.

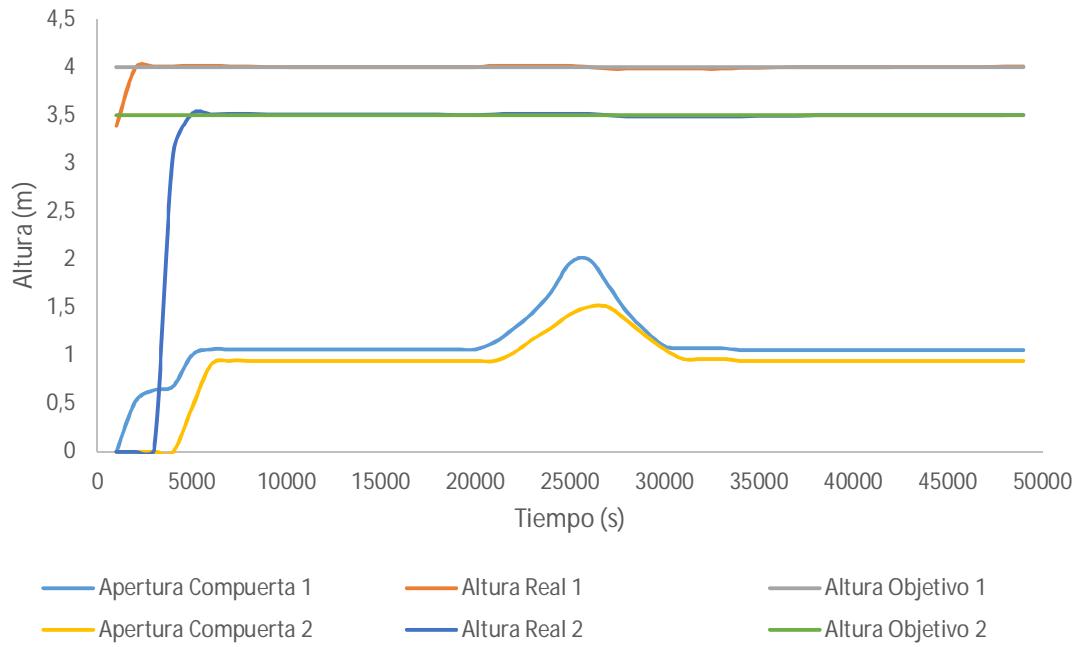


Figura 4.6.1 Evolución temporal de la apertura de las compuertas 1 (azul) y 2 (amarillo), del nivel superficial de agua antes de la compuerta 1 (naranja) y 2 (azul oscuro) y alturas objetivo de las compuertas 1 (gris) y 2 (verde) del caso 4

En la Figura 4.6.2 se muestra el nivel superficial para distintos instantes de tiempo a lo largo del canal. En $T=4.000$ s el tramo 1 ya ha alcanzado la altura objetivo de 4 m y la compuerta 1 se ha regulado para dejar pasar el caudal sobrante. Vemos como el tramo 2 se está llenando pero todavía no ha alcanzado la altura objetivo de 3,5 m y por lo tanto la compuerta 2 permanece cerrada. Para $T=20.000$ s el canal ha alcanzado el estacionario, al igual que para 30.000 s donde el pico de caudal ya ha recorrido todo el canal. Para $T=25.000$ s tenemos la punta del pico de caudal, donde se puede observar que el nivel superficial es mayor, a pesar de esto, las dos compuertas se regulan correctamente aumentando su apertura para seguir manteniendo las alturas objetivo. Por último tenemos $T=28.000$ s que es un punto intermedio entre el máximo pico de caudal y el estacionario y donde vemos un nivel superficial o calado intermedio.

A partir de la segunda compuerta, es decir, a partir de 4.000 m, no tenemos regulada ninguna altura objetivo al no existir ninguna compuerta transversal posterior, y como condición de salida tenemos $Froude=0,6$ para asegurar el flujo subcrítico, por eso el caudal de salida sufre ese descenso tan significativo.

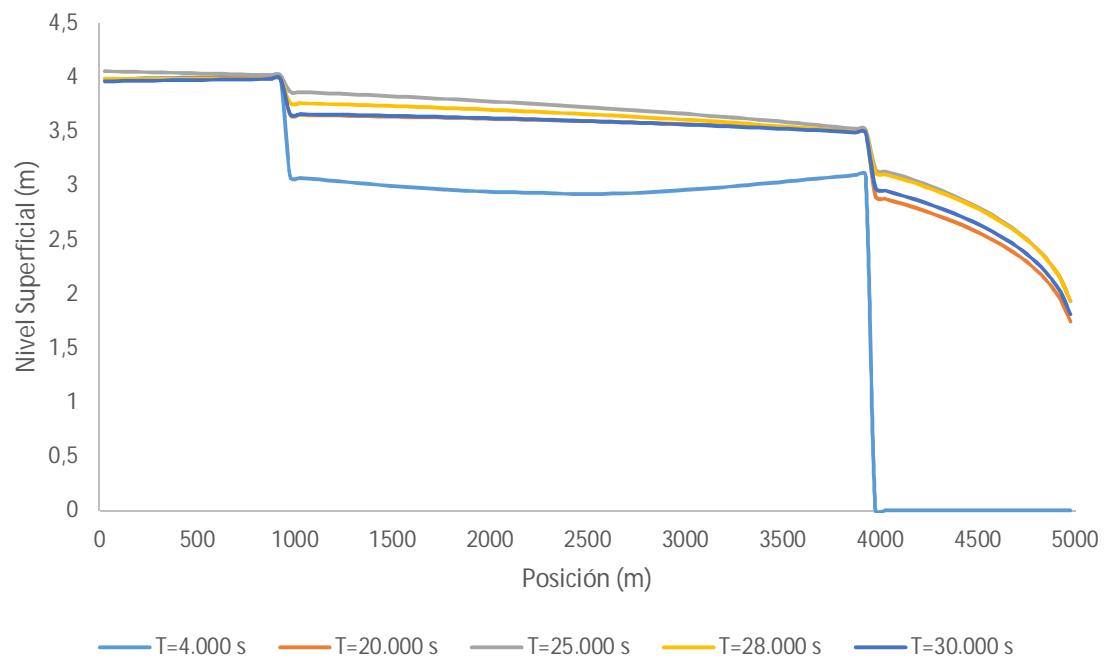


Figura 4.6.2 Perfiles de nivel superficial de agua a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo del caso 4

5 CASO 5: CONTROL AGUAS ARRIBA DE DOS COMPUERTAS TRANSVERSALES Y UNA TOMA LATERAL EN UN CANAL RECTO DE SECCIÓN TRAPEZOIDAL

En este caso buscamos como objetivo conseguir extraer un caudal de agua constante del canal necesario para que circule por las acequias que van a suministrar el riego de los terrenos adyacentes. Para conseguir el objetivo se introduce una toma lateral en el canal principal, la cual no está regulada por un controlador PID. Se trata simplemente de una tajadera y por tanto en nuestro modelo físico se modela como un agujero de sección rectangular por donde se extrae el caudal de agua que se necesite.

La geometría del canal sigue siendo la misma que hemos presentado en las simulaciones anteriores (ver *Figura 5.1* y *Figura 3.1.2*). Lo mismo ocurre con las condiciones iniciales y de contorno. Queremos saber cómo afecta la colocación de una toma lateral en el canal, cómo se comportan las compuertas transversales para regular la extracción de caudal que va a tener lugar a través de esta toma lateral y cómo consiguen sus alturas objetivo respectivas.

Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: *caso5doscompuertasunatomalateral*.

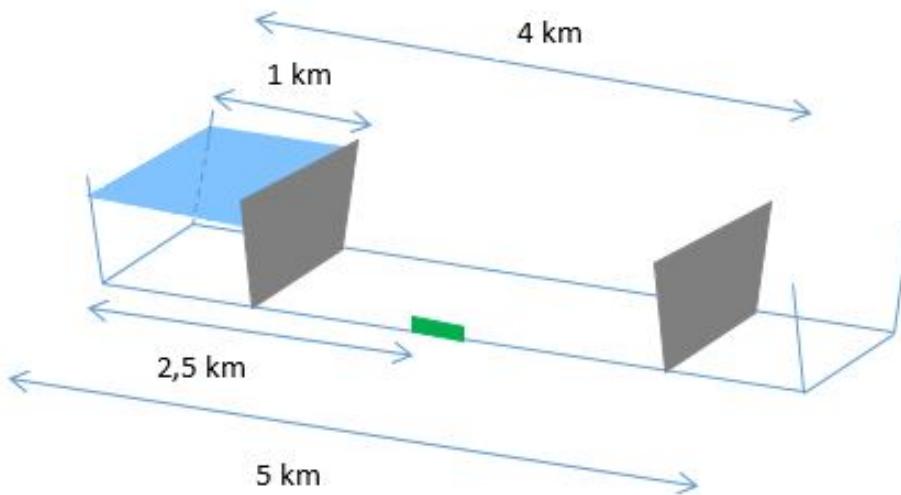


Figura 5.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 5

5.1 GEOMETRÍA

Longitud (m)	5.000
Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)	0,026
Ángulo de inclinación (m/m)	0,00015

Tabla 5.1 Datos geométricos del caso 5

5.2 CONDICIONES INICIALES

Estado inicial	Seco
----------------	------

Tabla 5.2 Estado inicial del caso 5

5.3 CONDICIONES DE CONTORNO

- Condiciones de entrada

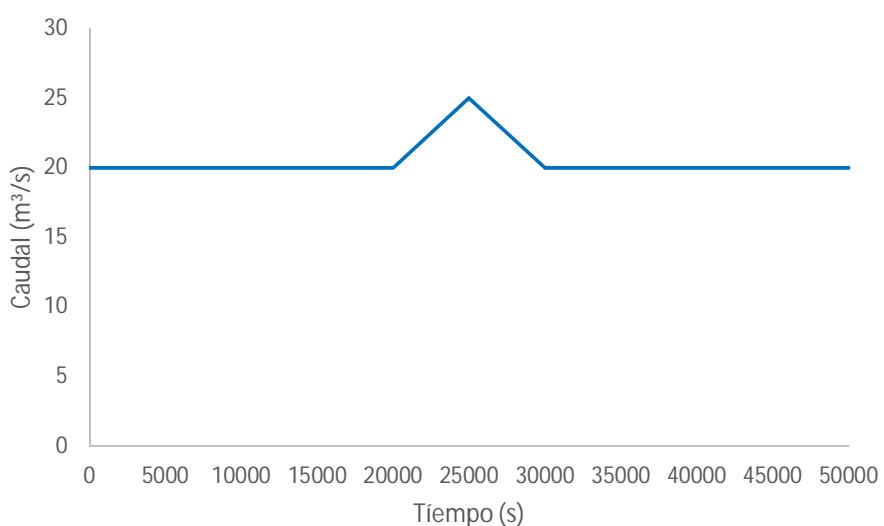


Figura 5.3 Hidrograma de entrada del caso 5

- Condiciones de salida

Froude	0,6
--------	-----

Tabla 5.3 Condición de salida del caso 5

5.4 COMPUERTAS

Número de compuerta	1
Posición (m)	1.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	4

Número de compuerta	2
Posición (m)	4.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	3,5

Tabla 5.4.1 Datos de las compuertas transversales del caso 5

Número de compuerta	3
Posición (m)	2.500
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	2
Apertura (m)	0,5

Tabla 5.4.2 Datos de la toma lateral del caso 5

La toma lateral se sitúa justo en el punto medio entre las dos compuertas transversales. En este caso hemos supuesto que modelamos una toma lateral de un canal ya existente, con lo cual la geometría de ésta queda definida por la anchura y la apertura, siendo rectangular, con un área de extracción de 1 m². Como he comentado anteriormente esta compuerta no está regulada automáticamente, por lo tanto tenemos dos opciones: que la compuerta esté cerrada porque no se necesita agua o que la compuerta esté completamente abierta para abastecer el terreno.

5.5 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 5.5 Parámetros de las compuertas transversales del caso 5

5.6 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN

En la *Figura 5.6.1* se muestra la regulación de ambas compuertas ante las variaciones de caudal en todo el dominio temporal (azul claro y amarillo), la altura objetivo deseada en cada tramo del canal (gris y verde) y el nivel superficial del agua que se obtiene en una posición del canal justo antes de las compuertas (naranja y azul).

Si observamos la *Figura 5.6.1* podemos ver que el comportamiento es análogo al caso anterior (caso 4). La compuerta 1, como partimos de la condición de entrada de lecho seco, permanece cerrada hasta que se va llenando el canal y conseguir en el primer tramo una altura objetivo de 4 m. Alcanzado este objetivo la compuerta 1 se va regulando para mantener esta altura deseada y el agua sigue su curso.

La compuerta 2 permanece cerrada durante todo este periodo de tiempo para alcanzar la altura objetivo de 3,5 m, cuando ésta se consigue, aproximadamente sobre unos 5.000 s (1 h 23 mins) la compuerta comienza a regularse para mantener la altura objetivo.

Como hemos visto el comportamiento es análogo, pero se puede matizar el comportamiento de ambas compuertas. Al haber una toma lateral, hay una extracción de caudal en el canal, con lo cual en el canal tenemos un menor caudal, con lo que para alcanzar las alturas objetivo las compuertas han de realizar unas aperturas inferiores a las dadas en el caso 4, y esto se observa claramente con las aperturas durante el estacionario y durante el pico de caudal de ambas compuertas.

	CASO 4	CASO 5
Compuerta 1	1,064	0,902
Compuerta 2	0,944	0,503

Tabla 5.5.1 Apertura máxima de las compuertas transversales 1 y 2 (en m) durante el estacionario en los casos 4 y 5

	CASO 4	CASO 5
Compuerta 1	2	1,443
Compuerta 2	1,506	0,784

Tabla 5.6.2 Apertura máxima de las compuertas transversales 1 y 2 (en m) durante el pico de caudal en los casos 4 y 5

En la *Tabla 5.6.1* se observa claramente como las aperturas de las dos compuertas son mayores en el caso 4 que en el caso 5. También en la *Tabla 5.6.2* se observa el mismo comportamiento, y esto es debido a la pérdida de caudal ocasionada por la toma lateral del caso 5.

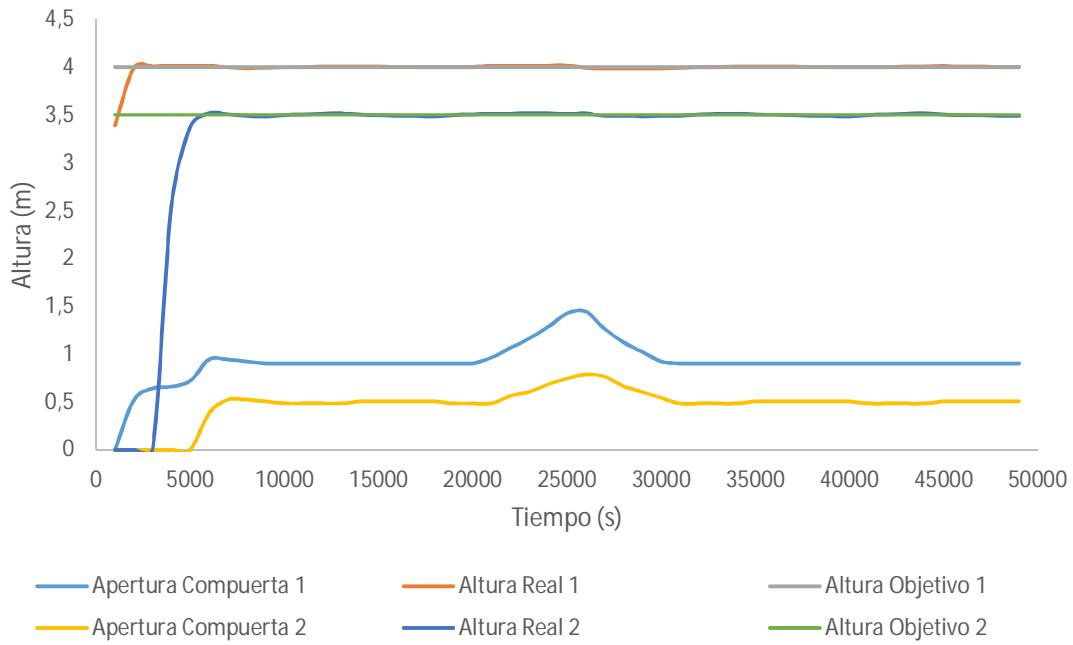


Figura 5.6.1 Evolución temporal de la apertura de las compuertas transversales 1 (azul) y 2 (amarillo), del nivel superficial del agua en los tramos del canal 1 (naranja) y 2 (azul oscuro) y alturas objetivo en los tramos del canal 1 (gris) y 2 (verde) del caso 5

Por otro lado podemos ver el caudal que recibimos por la toma lateral. La apertura es constante y de 0,5 m como hemos dicho en los datos de la compuerta lateral.

Así pues si observamos la Figura 5.6.2 vemos que partimos de 0 m³/s ya que partimos de seco, pero cuando alcanzamos el estacionario tenemos una extracción constante de 3,22 m³/s. Durante el pico de caudal (25.000 s) se puede ver que aporta levemente más caudal a la toma lateral.

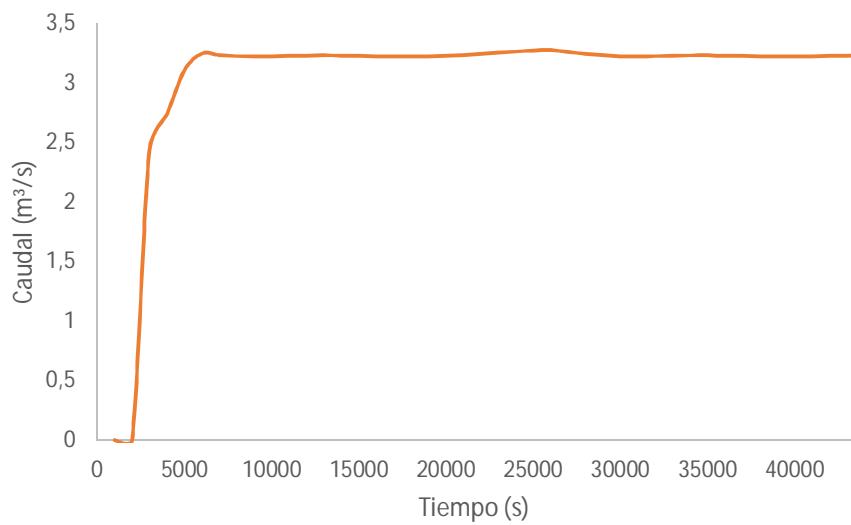


Figura 5.6.2 Evolución temporal del caudal de salida de la toma lateral del caso 5

TESTS DE REFERENCIA

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE) desarrolló una serie de casos de prueba para probar la idoneidad de algoritmos de control de compuertas en sistemas de regulación en un canal [Clemens, 1998]. El objetivo principal es establecer un marco común donde los desarrolladores de algoritmos puedan calibrar sus resultados numéricos. Las propiedades y características de funcionamiento de los canales de riego varían ampliamente. Los casos de prueba seleccionados deben cubrir una gama razonable de estas condiciones, deben ser realistas, y deben ser fáciles de implementar, para limitar la cantidad de tiempo y esfuerzo necesarios para realizar las pruebas e informar de los resultados. Originalmente, se consideraba una amplia gama y número de casos de prueba. Sin embargo, el comité se dio cuenta rápidamente de que el objetivo de las pruebas no era determinar qué sistema de control era mejor. Más bien, el objetivo principal era determinar si un controlador particular puede lograr un nivel razonable de rendimiento. Por lo tanto las condiciones de ensayo fueron idealizadas para reducir el esfuerzo necesario para llevar a cabo los casos de prueba.

En particular, el comité decidió examinar los controladores en canales no ramificados y con extracciones laterales por gravedad, además de un control de caudal en el canal mediante compuertas transversales. Otro requisito fundamental para observar el rendimiento del sistema de control es incluir cambios en la demanda de las extracciones laterales para observar el correcto funcionamiento del regulador ante la necesidad de un control anticipatorio. Para esto se seleccionaron dos test para cada canal, con diferentes extracciones laterales, uno con cambios menores en la demanda (sólo varían dos extracciones), y otro donde se representan múltiples cambios de la demanda (media docena de variaciones simultáneas).

Con lo cual, se presentan dos canales de prueba, que desde el punto de vista de las propiedades hidráulicas representan dos modelos de canales extremos. Para cada uno, se presentan dos escenarios de prueba para cubrir todo el rango de condiciones de flujo. Cada uno de los dos ensayos tiene una amplia variedad en la extracción de las tomas laterales, con extracciones variables en el tiempo, esto nos permitirá observar si nuestro algoritmo de control reacciona correctamente ante estos cambios tan repentinos y tan variables. Los dos canales elegidos se basan en dos canales de funcionamiento real, uno corto y de gran pendiente, con tiempos de respuesta rápidos, y el otro largo con una pendiente suave. Dos geometrías totalmente opuestas para cubrir todo el abanico de posibilidades. Las variaciones en las longitudes de cada tramo en un canal reflejan un problema potencial para los controladores en comparación con una serie de tramos que fueran todos iguales en longitud.

El objetivo de estas pruebas consiste en que el controlador sea capaz de mantener un nivel constante en el extremo aguas abajo de cada tramo del canal separado por una

compuerta transversal, en el cual se encuentran las extracciones (tomas laterales). El flujo de entrada en el canal es continuo. Esto se consigue suponiendo que aguas arriba se tiene un depósito o un canal mucho más amplio o un río. Dentro de este caso se proponen dos test de calibración: el TEST 1 con sólo dos variaciones en las extracciones de caudal de las tomas laterales y el TEST 2 con media docena de variaciones simultáneas. Ambos comparten los datos de la geometría del canal. A continuación se dan los detalles de cada caso en particular.

6 CASO 6: CANAL DE ANCHURA VARIABLE, SECCIÓN TRAPEZOIDAL, CON PENDIENTE FUERTE

6.1 TEST 1

Se puede recrear el test 1 introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: *caso6asce1test1*.

A continuación se presentan todos los datos del test 1.

6.1.1 Geometría

El canal a simular tiene una geometría ya definida previamente por ASCE [Clemens 1998]. Este canal tiene unas condiciones geométricas extremas, ya que cuenta con una gran pendiente y múltiples variaciones de anchura.

Su longitud es de 9.500 m y una pendiente lateral de 1,5 m/m. Su sección transversal tiene forma trapezoidal con dimensiones variables en cada sección. El canal a lo largo de toda su longitud posee una pendiente constante de 0,002 m/m. El coeficiente de rozamiento de Manning es 0,014 s/m^{1/3} y la simulación tiene una duración de 24 h (86.400 s) (ver *Tabla 6.1.1.1*).

Longitud (m)	9.500
Coeficiente de Manning (s/m^{1/3})	0,014
Ángulo de inclinación (m/m)	0,002

Tabla 6.1.1.1 Datos geométricos del Test 1 del caso 6

El perfil longitudinal del canal se puede observar en la *Figura 6.1.1.1*, donde se ve la longitud total del canal, la longitud de cada tramo, y la pendiente constante de todo el canal, gráficamente se aprecia que el canal consta de una pendiente importante. Se parte de una altura inicial de 26,9 m.

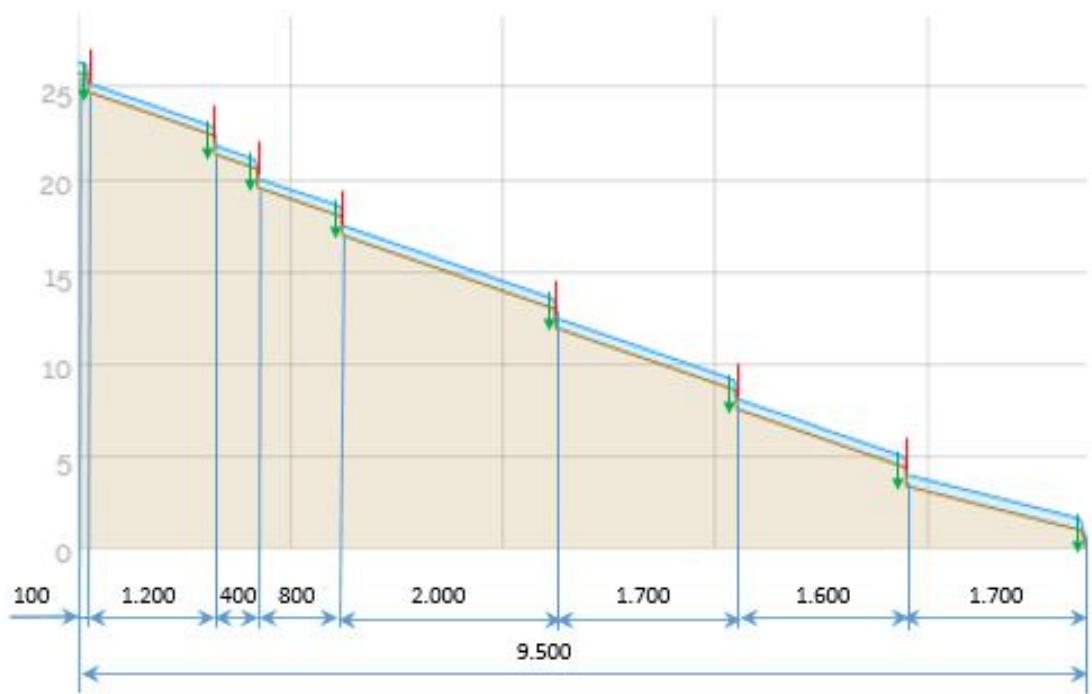


Figura 6.1.1.1 Perfil longitudinal en m del canal del Test 1 del caso 6

Al final de cada tramo tenemos una compuerta transversal (rojo), para facilitar el paso del agua en estos puntos tenemos escalones de altura 1 m en cada cambio de tramo.

La geometría de cada sección queda definida bajo la geometría de la *Figura 6.1.1.2*, pero para cada sección el ancho del fondo y la profundidad del canal varían según la *Tabla 6.1.1.2*.

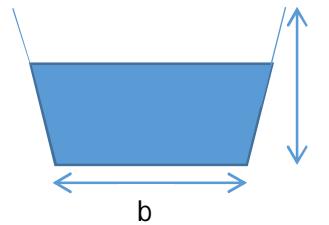


Figura 6.1.1.2 Sección transversal del canal del Test 1 del caso 6

A continuación se presenta la *Tabla 6.1.1.2* con todas las medidas de cada tramo.

Tramos	Longitud piscina (m)	Ancho del fondo b (m)	Profundidad del canal l (m)
1	100	1	1,1
2	1.200	1	1,1
3	400	1	1
4	800	0,8	1,1
5	2.000	0,8	1,1
6	1.700	0,8	1
7	1.600	0,6	1
8	1.700	0,6	1

Tabla 6.1.1.2 Datos geométricos de las secciones del Test 1 del caso 6

6.1.2 Condiciones Iniciales

Como condición inicial se parte de un estacionario de caudal constante de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta condición inicial nos dará unos datos erróneos al comienzo de la simulación, ya que no es cierto que tengamos esa cantidad de agua en todo el canal, pero con el paso de un breve espacio de tiempo (6.000 s aproximadamente) las tomas laterales desalojarán el agua sobrante y la simulación seguirá correctamente.

Se ha decidido elegir esta condición inicial porque es más sencilla de interpretar para el controlador. La otra opción habría sido comenzar con un lecho seco pero se corre el riesgo de que el controlador inicialmente no actúe correctamente.

Estado inicial	$Q_{\text{CONSTANTE}}=0,8 \text{ m}^3/\text{s}$
----------------	---

Tabla 6.1.2 Estado inicial del Test 1 del caso 6

6.1.3 Condiciones de Contorno

- Condiciones de entrada

El caudal impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 6.1.3* y responde a un hidrograma variable. Durante las dos primeras horas (7.200 s) tenemos un caudal de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, pasadas estas dos primeras horas aumenta el caudal de entrada hasta $1 \text{ m}^3/\text{s}$ y permanece constante durante 12 h, hasta las 14 h (50.400 s) desde

el inicio de la simulación. Aquí vuelve a disminuir el caudal de entrada hasta los $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ y ya se mantiene constante este caudal hasta el final de la simulación.

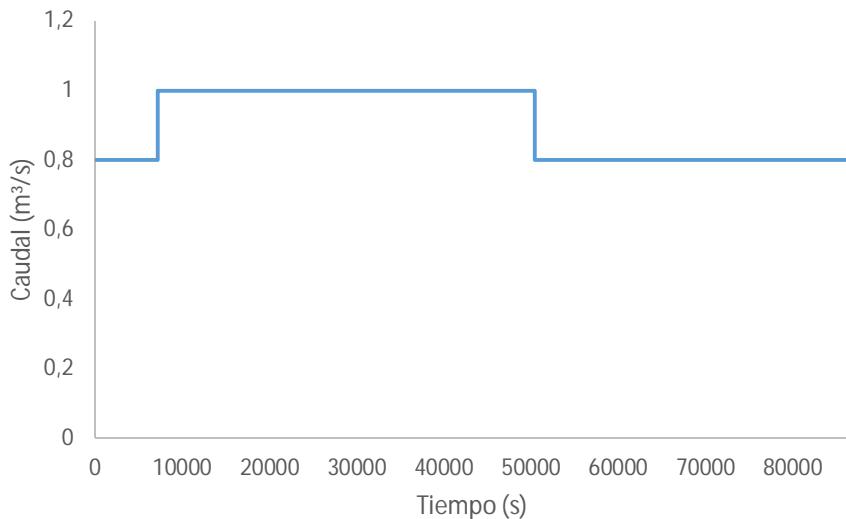


Figura 6.1.3 Hidrograma de entrada del Test 1 del caso 6

• Condiciones de salida

Como condición de contorno aguas abajo se impone salida libre.

Condición de salida	Libre
---------------------	-------

Tabla 6.1.3 Condición de salida del Test 1 del caso 6

6.1.4 Compuertas

En este caso tenemos 8 compuertas transversales y 8 tomas laterales. Las compuertas transversales se encuentran todas al final de cada tramo y tienen unas alturas objetivo de 0,8 o 0,9 m dependiendo de la compuerta.

Los datos de las compuertas transversales quedan bien explicados en la *Tabla 6.1.4.1*.

Número de compuerta	1
Posición (m)	100
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,9

Número de compuerta	2
Posición (m)	1.300
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,9
Número de compuerta	3
Posición (m)	1.700
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,8
Número de compuerta	4
Posición (m)	2.500
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,9
Número de compuerta	5
Posición (m)	4.500
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,9
Número de compuerta	6
Posición (m)	6.200
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,8
Número de compuerta	7
Posición (m)	7.800
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,8
Número de compuerta	8
Posición (m)	9.500
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,8

Tabla 6.1.3.1 Compuertas transversales de regulación automática del Test 1 del caso 6

Todas las tomas laterales se encuentran 5 m aguas arriba de las compuertas transversales y todas ellas han de extraer un caudal de 0,1 m³/s. A la hora de introducir este dato para realizar la simulación nos encontramos con un pequeño problema ya que se puede modelizar la geometría de la toma lateral, pero no podemos introducir el caudal de extracción deseado. Para conseguir tener exactamente la extracción de agua que se pide en las tomas laterales se realizaron varias simulaciones para dar con la geometría adecuada que consiguiera extraer 0,1 m³/s por cada toma lateral.

Hay que tener en cuenta que la geometría del canal es peculiar y diferente en cada sección, y que la cantidad de agua que pasa por el canal es escasa, con lo cual conforme la toma lateral se encuentra más cerca del final del canal más grande es el área de la toma lateral.

A continuación se muestran los datos de las tomas laterales en la *Tabla 6.1.4.2.*

Número de compuerta	1
Posición (m)	95
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,06
Apertura (m)	0,1
Número de compuerta	2
Posición (m)	1.295
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,06
Apertura (m)	0,1
Número de compuerta	3
Posición (m)	1.695
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,07
Apertura (m)	0,1
Número de compuerta	4
Posición (m)	2.495
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,07
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	5
Posición (m)	4.495
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,09
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	6
Posición (m)	6.195
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,1
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	7
Posición (m)	7.795
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,13
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	8
Posición (m)	9.495
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,7
Apertura (m)	0,4

Tabla 6.1.4.2 Datos de las tomas laterales del Test 1 del caso 6

Con todos estos datos se realizaron varias simulaciones y la última compuerta transversal y la última toma lateral daban unos resultados desconcertantes y que no se ajustaban a la realidad. Esto se debe a un problema numérico ya que ambas se encuentran en la última celda que discretiza el dominio. En esta simulación tenemos una longitud de 9.500 m y el dominio está discretizado en 1.000 celdas, esto quiere decir que cada 9,5 m tenemos una celda. A la hora de realizar las simulaciones la primera y la última celda del dominio son conflictivas, con lo que hay que evitar tener cualquier elemento en estas celdas.

Ante este problema se analizó cual podía ser la mejor solución. Se puede observar que el caudal de entrada es de 0,8 m³/s y cada toma lateral extrae 0,1 m³/s habiendo 8 tomas laterales, por lo tanto todo el caudal que entra en el canal se extrae por las tomas laterales y aguas abajo del canal no llega nada de agua. Con lo cual la última compuerta transversal es totalmente prescindible, así que se eliminó de la simulación porque no afecta en nada. Así pues finalmente se dejaron 7 compuertas transversales (de la 1 a la 7 de la Tabla 6.1.4.1).

Por otro lado la última toma lateral se decidió desplazarla unos metros aguas arriba para que no coincidiese con la última celda de cálculo, dado que la zona de conflicto está a 9,5 m del final del canal, se colocó la toma lateral 8 a una distancia de 9.485 m del inicio del canal en lugar de los 9.495 m que estaba colocada inicialmente (ver *Tabla 6.1.4.3*).

Esta modificación tampoco implica cambios en la simulación ya que esta última toma lateral se encarga de extraer todo el caudal que va llegando a ese punto.

Número de compuerta	8
Posición (m)	9.485
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,7
Apertura (m)	0,4

Tabla 6.1.4.3 Datos de la toma lateral número 8 del Test 1 del caso 6

6.1.5 Especificaciones para el control

En este caso la regulación de los parámetros ha sido especialmente compleja debido a la gran cantidad de compuertas transversales, con alturas objetivo diferentes, y la cantidad de tomas laterales con variaciones en las extracciones de caudal de las mismas. Esto último implica que las compuertas transversales están constantemente actuando para alcanzar las alturas objetivo prefijadas. Otro hándicap a tener en cuenta es que contamos con un regulador PID para regular todas las compuertas, es decir, tenemos que encontrar unos parámetros válidos en común para todas las compuertas. Esto se podría optimizar si cada compuerta tuviera un regulador PID, ya que se podría configurar cada compuerta por separado. Para este caso, se encontraron unos parámetros que permitían obtener la simulación lo más estable posible dentro de las dificultades citadas. Los parámetros obtenidos se muestran en la *Tabla 6.1.5*.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	1
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 6.1.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 1 del caso 6

6.1.6 Extracciones de caudal en las tomas laterales

Inicialmente, las tomas laterales tienen una extracción de caudal de 0,1 m³/s. Para hacer el caso más complejo y observar si el regulador PID funciona correctamente regulando las compuertas transversales se introducen variaciones en la extracción de caudal de las tomas laterales. Pasadas dos horas del comienzo de la simulación las tomas laterales 2 y 3 duplican su caudal de extracción durante 12 h. A las 14 h de simulación, la toma lateral 3 mantiene 0,2 m³/s, la toma lateral 4 vuelve a tener una extracción de 0,1 m³/s y la toma lateral 5 se cierra totalmente. Las variaciones sufridas a lo largo de la simulación se muestran en la *Tabla 6.1.6* y en la *Figura 6.1.6*.

Número de toma lateral	Caudal de extracción inicial tomas laterales (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 2 h del inicio de la simulación (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 14 h del inicio de la simulación (m ³ /s)
1	0,1	0,1	0,1
2	0,1	0,1	0,1
3	0,1	0,2	0,2
4	0,1	0,2	0,1
5	0,1	0,1	0
6	0,1	0,1	0,1
7	0,1	0,1	0,1
8	0,1	0,1	0,1

Tabla 6.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 6

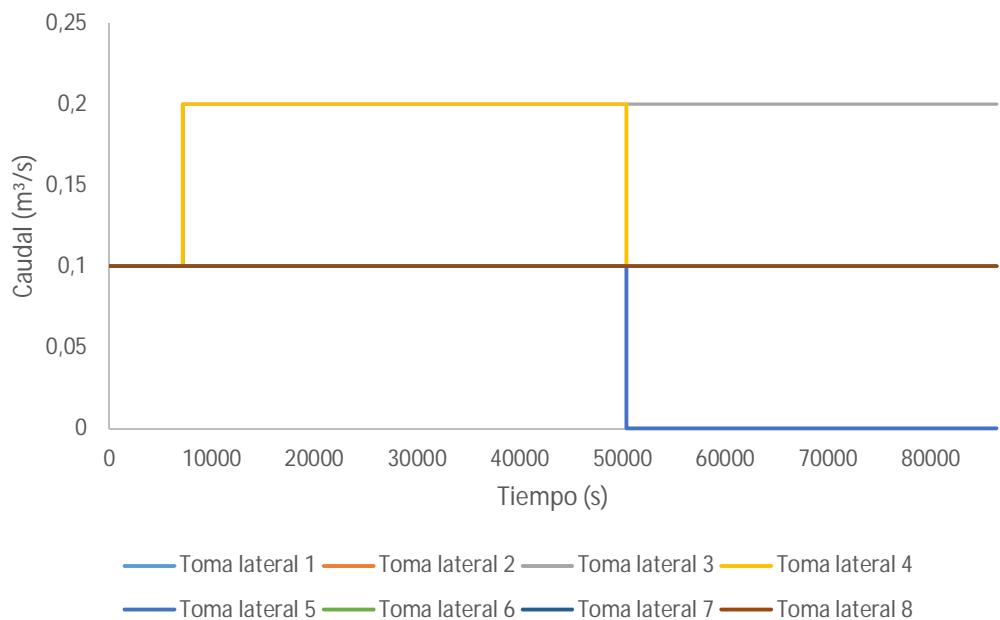


Figura 6.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 6

6.1.7 Resultado de la simulación

Estos resultados que se presentan a continuación del TEST 1 corresponden a la última simulación realizada con éxito, donde todos los resultados daban lo esperado.

Para llegar hasta este resultado hubo que realizar aproximadamente 50 simulaciones, modificando y comprobando muchos datos, encontrando la geometría adecuada de cada toma lateral, eliminando elementos de las celdas conflictivas, encontrando los parámetros óptimos del regulador PID y variando los caudales de las tomas laterales.

En la *Figura 6.1.7.1* se muestra la evolución temporal del error de masa cometido en la simulación. Este dato nos proporciona información sobre la relación que hay entre el agua que entra en el canal, el agua que es transportada por el canal y el agua que sale, es decir, si tenemos un error de 0 durante toda la simulación quiere decir que el volumen de agua en el canal se conserva, que no se han sufrido pérdidas de agua en el transcurso de la simulación a causa del método numérico. Constatamos de esta forma que el método de cálculo es conservativo.

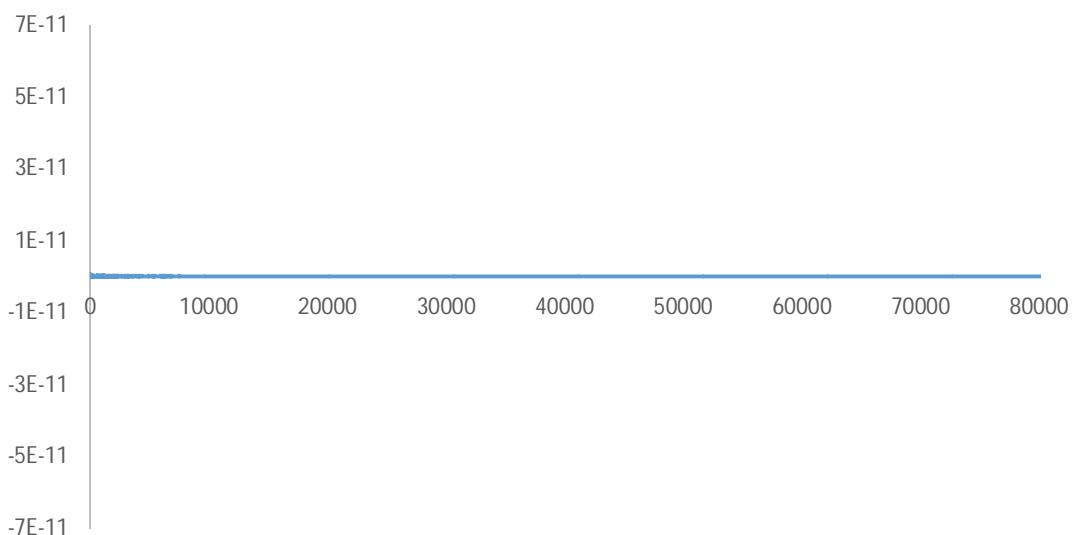


Figura 6.1.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 1 del caso 6

En la *Figura 6.1.7.2* se muestra la evolución temporal de los caudales de entrada (línea azul) y salida (línea naranja) del canal. El caudal de entrada se ajusta al hidrograma de entrada de la *Figura 6.1.3*. Respecto al caudal de salida, si observamos la relación entre el hidrograma de entrada y la extracción de las tomas laterales vemos que el caudal de agua que entra en el canal se extrae totalmente por las tomas laterales, extrayendo la última toma lateral el caudal sobrante en el canal, es decir, el caudal de salida del canal debería ser 0 a lo largo de toda la simulación. Si analizamos el caudal de salida (naranja) vemos que

al principio de la simulación extrae $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente y tarda unos 6.000 s en llegar a tener caudal de salida 0. Esto es debido a que en las condiciones iniciales del caso hemos supuesto un caudal de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ en todo el canal para evitar problemas con el regulador. Este caudal sobrante con el que partimos inicialmente tarda un tiempo en extraerse mediante las tomas laterales y mediante el caudal de salida del canal. Esto no es un problema para el caso ya que simplemente hay que saber que el canal necesita un tiempo para alcanzar las condiciones de la simulación y por tanto, los datos iniciales no son útiles para observar el comportamiento del canal.

Pasado este tiempo inicial, el caudal de salida se mantiene constante en $0 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta aproximadamente 54.000 s. A las 14 h (50.400 s) del inicio de la simulación hay una variación en la extracción de caudal de 3 tomas laterales, esto provoca que el agua se transporte a lo largo de todo el canal y no salga por las tomas laterales. En cuanto se regula de nuevo la situación, en unos 2.000 s, el caudal de salida vuelve a ser $0 \text{ m}^3/\text{s}$ y así se mantiene hasta el final de la simulación.



Figura 6.1.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 1 del caso 6

En la Figura 6.1.7.3 se ve un perfil longitudinal del canal en $T=0$. Podemos ver la condición inicial introducida (Tabla 6.1.2). Todo el canal tiene un caudal de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. A su vez también se muestra la geometría del canal, con su fuerte pendiente y el escalón de un metro que hay entre cada tramo.

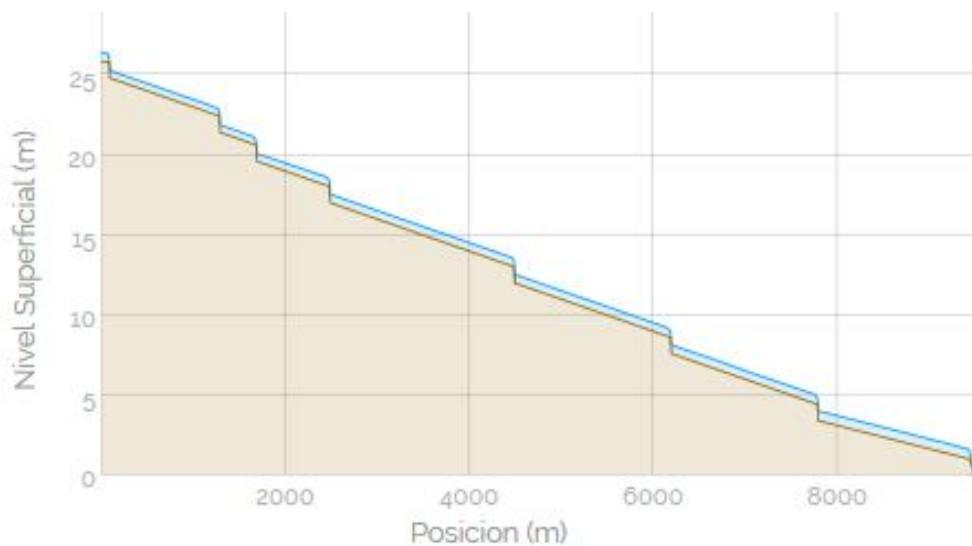


Figura 6.1.7.3 Perfil longitudinal del canal en $T=0$ s del Test 1 del caso 6

En la *Figura 6.1.7.4* se ve un perfil longitudinal del canal en $T=7.000$ s. En este instante de tiempo aún no se ha producido ninguna variación en las extracciones de caudal de las tomas laterales, con lo cual todas extraen $0,1\text{ m}^3/\text{s}$. A su vez ya ha pasado tiempo suficiente para desalojar el agua sobrante de la condición inicial. Correspondría a la situación ideal de partida de estacionario con caudal constante de $0,8\text{ m}^3/\text{s}$ y todas las tomas laterales extrayendo $0,1\text{ m}^3/\text{s}$. Podemos observar como al final de cada tramo el agua está remansada gracias a las compuertas transversales, esto permite que las tomas laterales extraigan el caudal deseado.

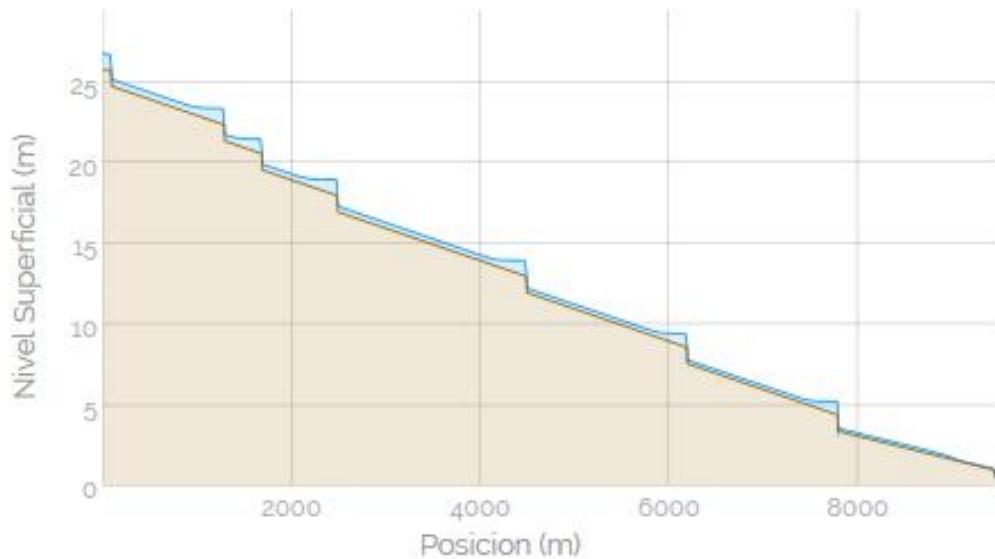


Figura 6.1.7.4 Perfil longitudinal del canal en $T=7.000$ s del Test 1 del caso 6

En la *Figura 6.1.7.5* se muestra el perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=7.000$ s. Al principio del canal tenemos $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, a los 95 m tenemos la primera toma lateral que desaloja un caudal de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ con lo que el caudal del canal desciende hasta $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$, se mantiene constante hasta que alcanza la siguiente toma lateral situada a 1.295 m, ésta también extrae $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, con lo cual el caudal del canal desciende hasta $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Si seguimos el recorrido a lo largo de todo el canal se va extrayendo todo el caudal por las tomas laterales, hasta obtener un caudal de salida de $0 \text{ m}^3/\text{s}$. Los picos de caudal que descienden hasta $0 \text{ m}^3/\text{s}$ simplemente es un defecto de representación, ya que éstos nunca deberían de producirse.

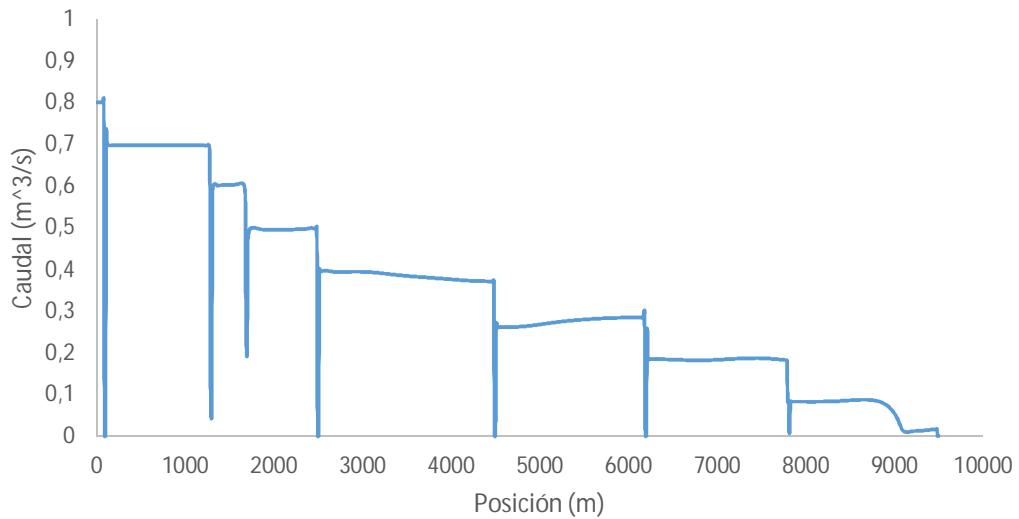


Figura 6.1.7.5 Perfil longitudinal de caudal en $T=7.000$ s del Test 1 del caso 6

En la *Figura 6.1.7.6* se muestra otro perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=34.000$ s. Ocurre lo mismo que lo descrito en la *Figura 6.1.7.5* pero con la diferencia de que las extracciones de caudal en las tomas laterales han sufrido variaciones y que el caudal de entrada es $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en lugar de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Las tomas laterales 3 y 4 ahora extraen $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

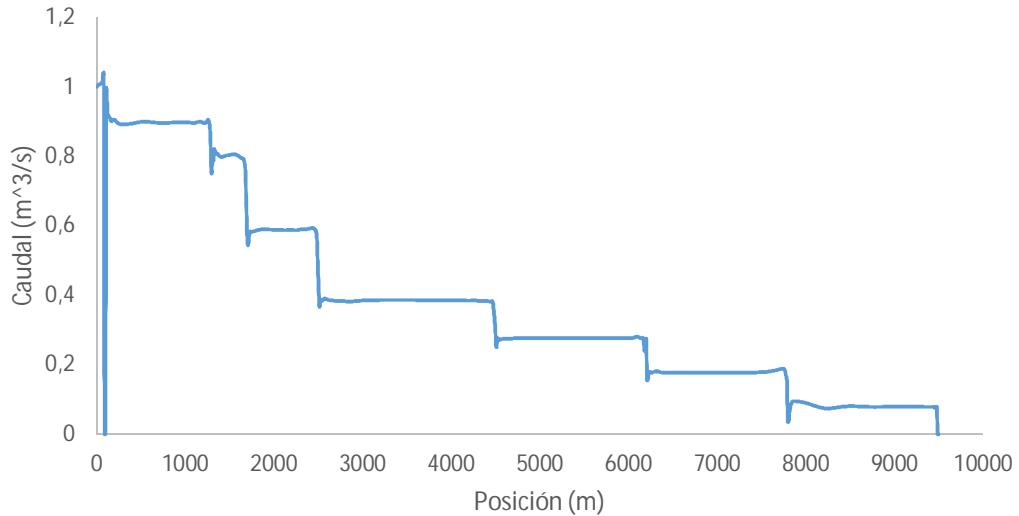


Figura 6.1.7.6 Perfil longitudinal de caudal en $T=34.000$ s del Test 1 del caso 6

Por último, en la *Figura 6.1.7.7* se muestra un último perfil del caudal que hay en $T=64.000$ s. Las extracciones de caudal en las tomas laterales han sufrido variaciones y el

caudal de entrada vuelve a ser $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. La toma lateral 4 ahora extrae $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ y la toma lateral 5 está completamente cerrada.

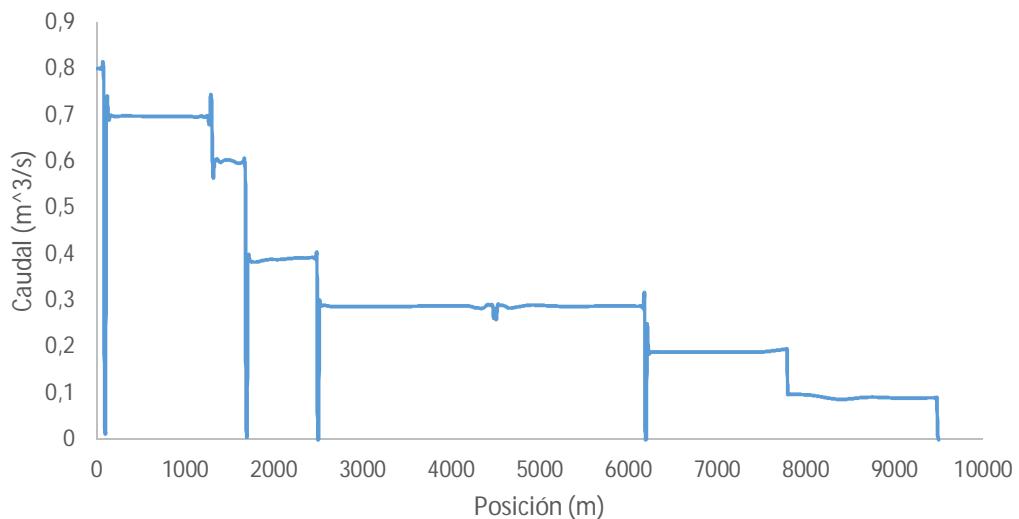


Figura 6.1.7.7 Perfil longitudinal de caudal en $T=64.000 \text{ s}$ del Test 1 del caso 6

Hemos comprobado como los caudales dentro del canal concuerdan con los resultados esperados, esto debe ser corroborado a la hora de examinar el funcionamiento de las compuertas transversales y de las tomas laterales. Para analizar ahora con detalle el comportamiento de las compuertas transversales se muestra una figura de cada compuerta por separado. Desde la *Figura 6.1.7.8* hasta la *Figura 6.1.7.14* se observan las aperturas de cada compuerta (azul), el nivel superficial del agua antes de cada compuerta (naranja) y la altura objetivo (gris). Todas las compuertas tienen un comportamiento semejante, es decir, como en el canal tenemos poco caudal las compuertas oscilan entre cerradas y una apertura de 0.1 m para conseguir sus alturas objetivo. Es cierto que las compuertas se abren mínimamente para dejar paso al caudal pero si vemos las aperturas son continuas, es decir, las compuertas están actuando constantemente para conseguir sus alturas objetivo. Respecto a las alturas objetivo vemos que todas las compuertas consiguen mantener el nivel superficial de su tramo cercano a lo deseado, aunque no sea constante. Es difícil conseguir un nivel superficial en cada tramo constante debido a la cantidad de tomas laterales, compuertas transversales, variaciones en las condiciones de entrada y variaciones en las extracciones de las tomas laterales, pero se consigue acercarse lo máximo posible a las alturas objetivo.

Compuerta transversal 1

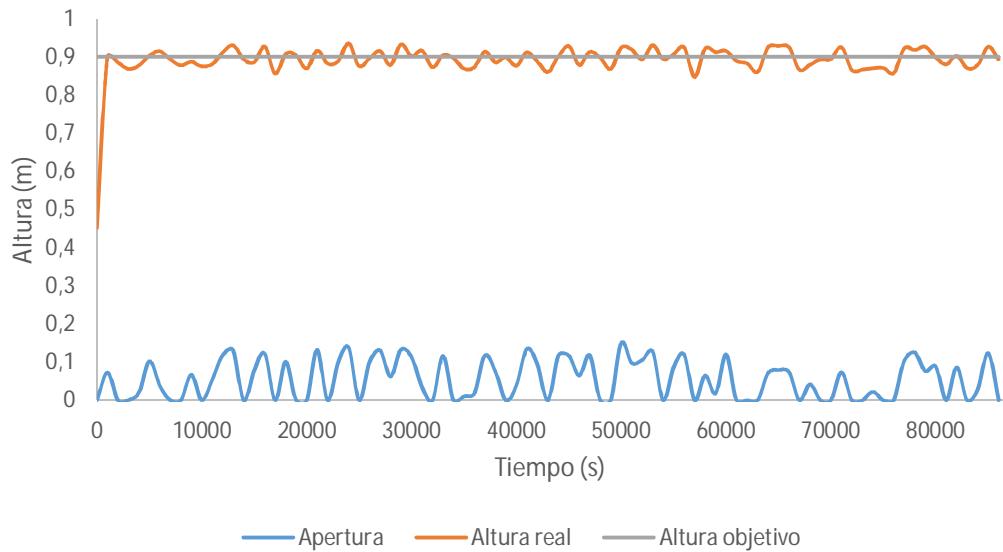


Figura 6.1.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 1 del caso 6

Compuerta transversal 2

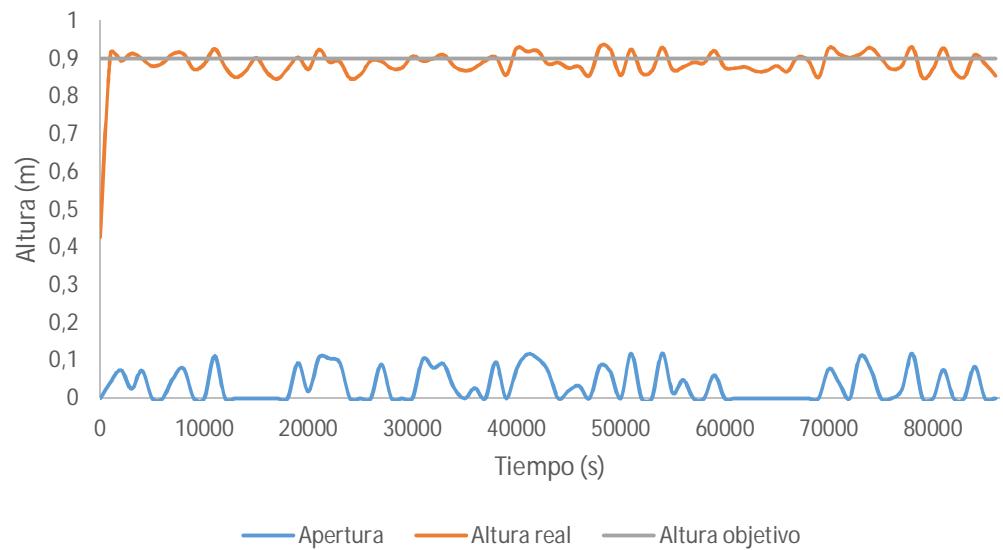


Figura 6.1.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 1 del caso 6

Compuerta transversal 3

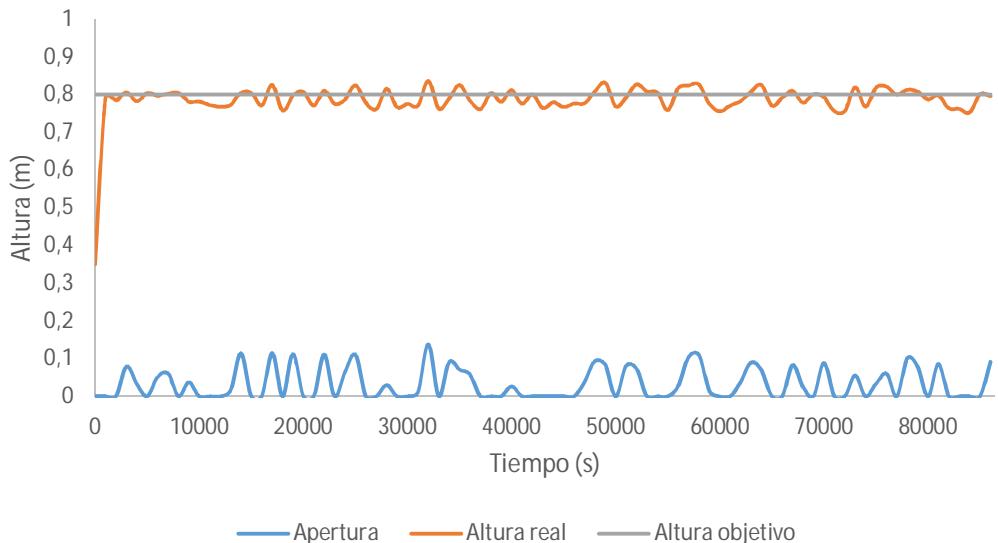


Figura 6.1.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 1 del caso 6

Compuerta transversal 4

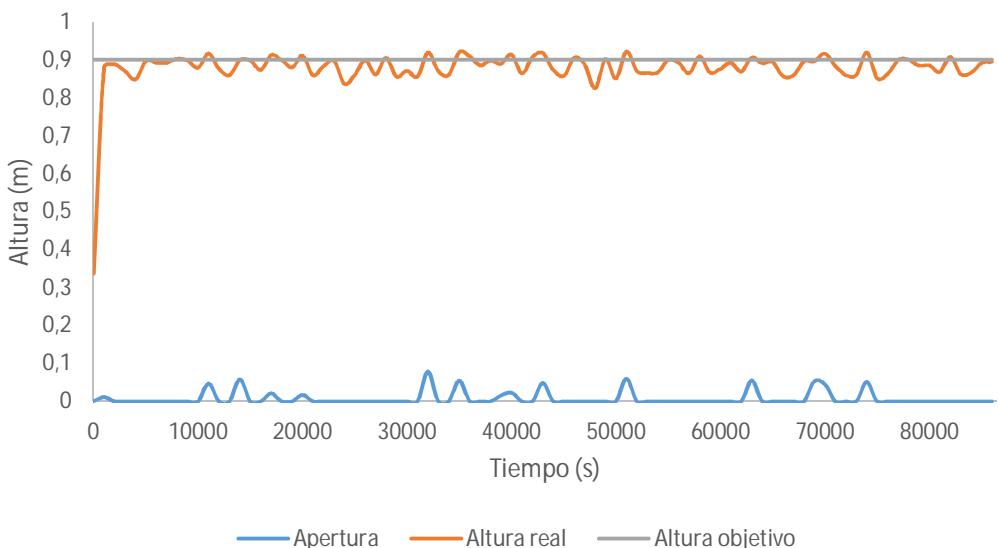


Figura 6.1.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 1 del caso 6

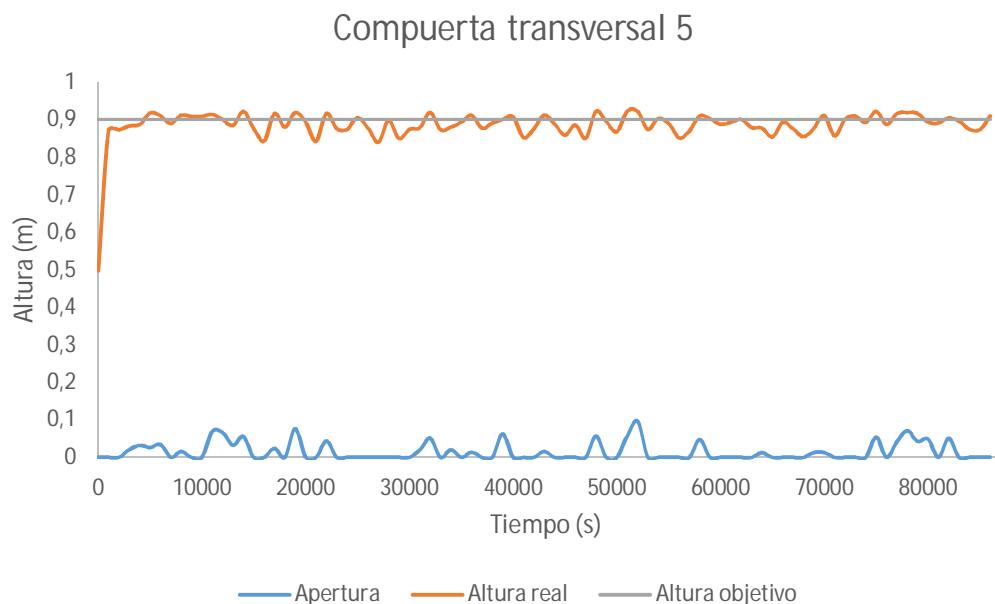


Figura 6.1.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 1 del caso 6

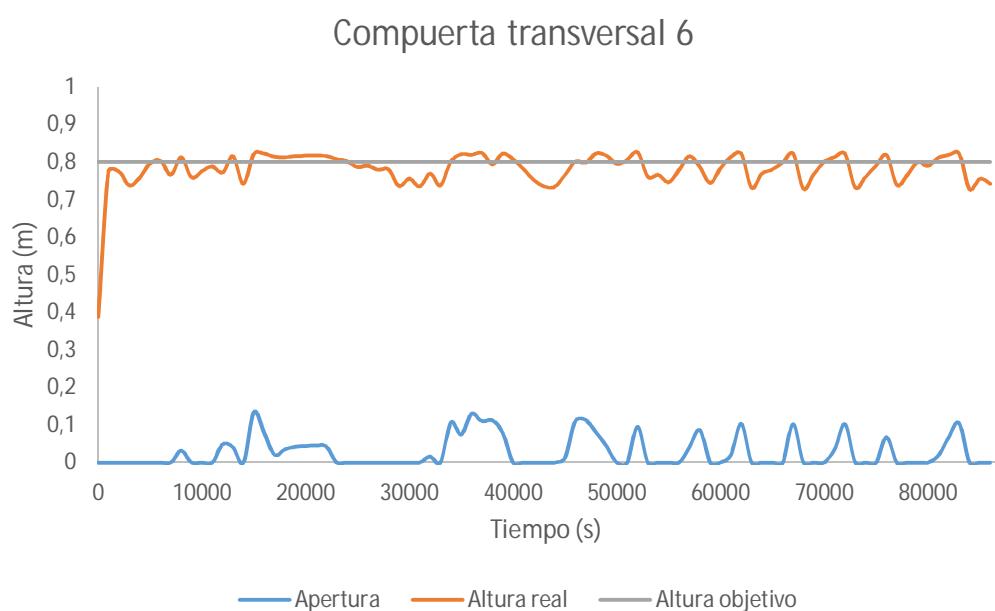


Figura 6.1.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 1 del caso 6

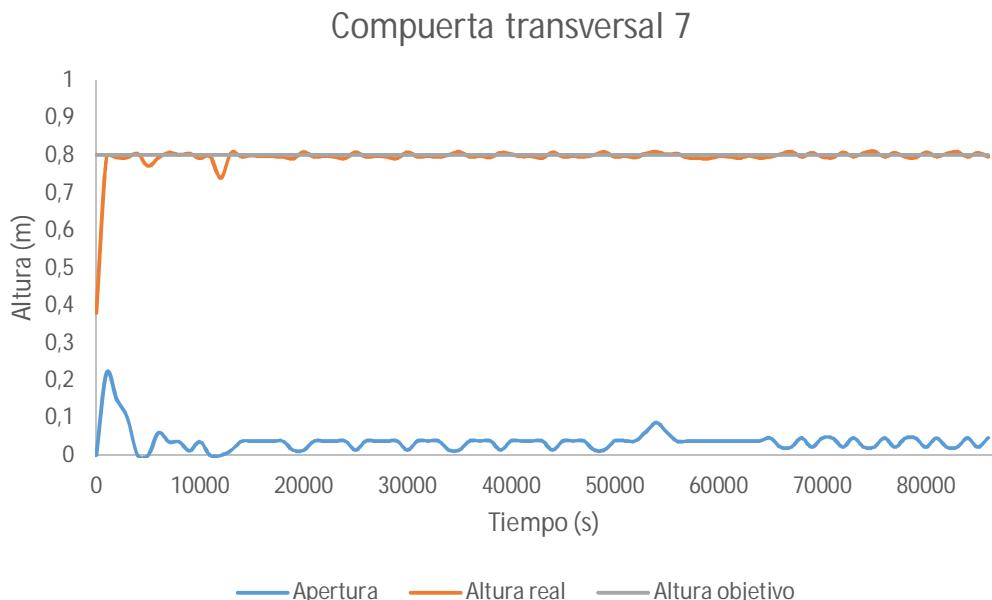


Figura 6.1.7.14 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 1 del caso 6

Por último, nos queda por ver el comportamiento de las tomas laterales. En la *Figura 6.1.7.15* se muestran las aperturas de todas las tomas laterales. Se observa como a las 2 h (7.200 s) del comienzo de la simulación se produce una variación en la apertura de las tomas 3 y 4 para conseguir extraer el doble de caudal ($0,2 \text{ m}^3/\text{s}$) y pasadas 14 h (50.400 s) desde el inicio de la simulación hay otro cambio en la apertura de las tomas 4 y 5. La toma lateral 4 vuelve a tener una apertura de 0,1 m mientras que la toma lateral 5 se cierra totalmente hasta el final de la simulación. Las tomas laterales 1, 2, 6 y 7 mantienen su apertura durante toda la simulación y la toma lateral 8 tiene una apertura constante de 0,4 m.

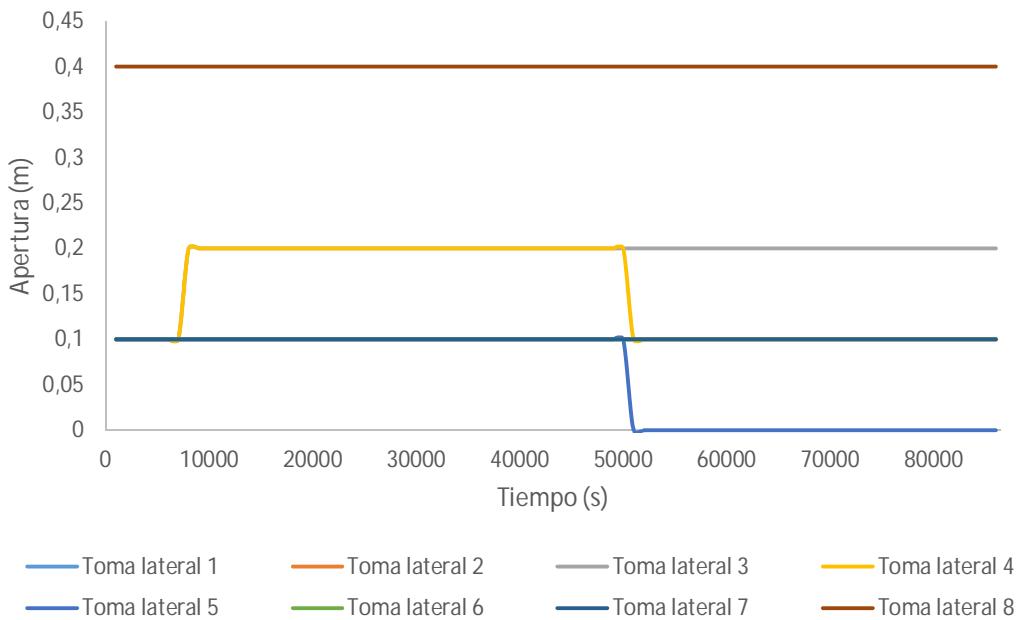


Figura 6.1.7.15 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 1 del caso 6

Para observar mejor los caudales de extracción de las tomas laterales se presentan dos Figuras. En la *Figura 6.1.7.16* se ven las 4 primeras tomas laterales y en la *Figura 6.1.7.17* se ven las 4 últimas tomas laterales. En la *Figura 6.1.7.16* podemos ver como las tomas laterales 1 y 2 (azul y naranja) extraen un caudal constante de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ a lo largo de toda la simulación. La toma lateral 3 (gris) parte con una extracción de caudal de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ y pasadas 2 h (7.200 s) aumenta su caudal de extracción a $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el final de la simulación. Lo mismo ocurre con la toma lateral 4 (amarillo) que aumenta su caudal de extracción hasta $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ pero a las 14 h (50.400 s) disminuye su caudal hasta $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ nuevamente.

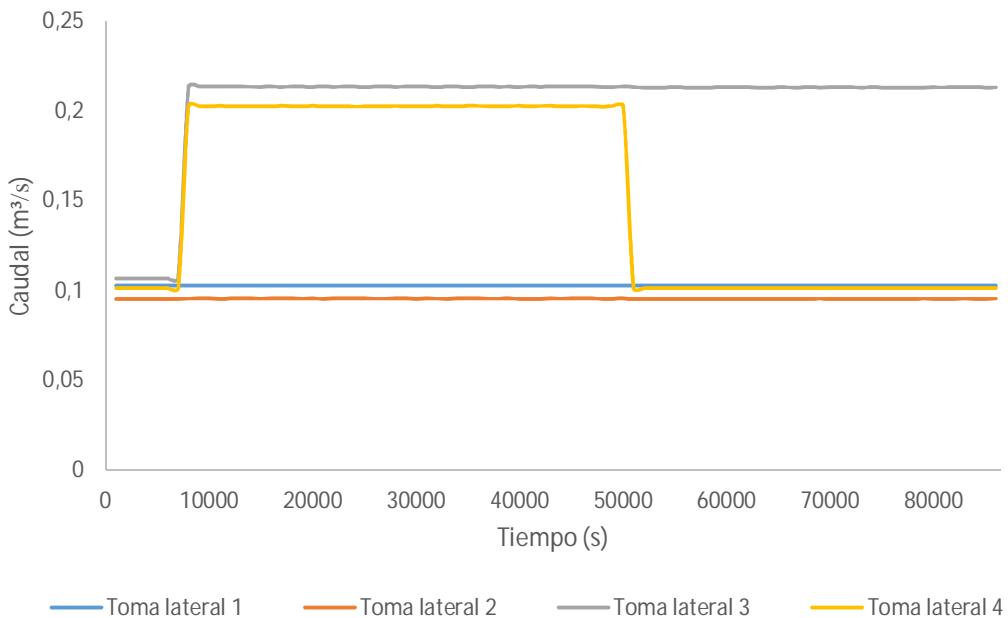


Figura 6.1.7.16 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales 1, 2, 3 y 4 del Test 1 del caso 6

En la Figura 6.1.7.17 podemos ver como la toma lateral 5 (azul) extrae $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta que pasadas 14 h (50.400 s) se cierra totalmente y no permite extracción de caudal. Las tomas laterales 6 y 7 tienen una extracción constante de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. La toma lateral 8 (amarillo) es la más conflictiva. En los primeros instantes debe evacuar todo el caudal sobrante con el que partíamos en la simulación, pasado este primer tramo consigue tener una extracción más o menos constante de cerca de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. A las 14 h (50.400 s), cuando hay variaciones en los caudales de extracción de las tomas laterales tiene un pico de extracción de caudal, esto es debido a que mientras las compuertas se regulan pasa el caudal a lo largo del canal y lo recoge todo la última toma lateral. Pasado este punto vuelve a conseguir una extracción más o menos constante de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el final de la simulación. El problema de esta toma lateral 8 es que aguas abajo no tiene una compuerta transversal que remanse el agua y permita extraerla por la toma lateral de manera constante, con lo cual el agua se extrae por la toma lateral conforme va llegando a través del canal y por lo tanto aparecen picos de caudal. Si comparamos el caudal de extracción real de las tomas laterales con el caudal de extracción deseado (ver Figura 6.1.6) vemos que sale un resultado semejante, a excepción del problema mencionado anteriormente en la toma lateral 8.

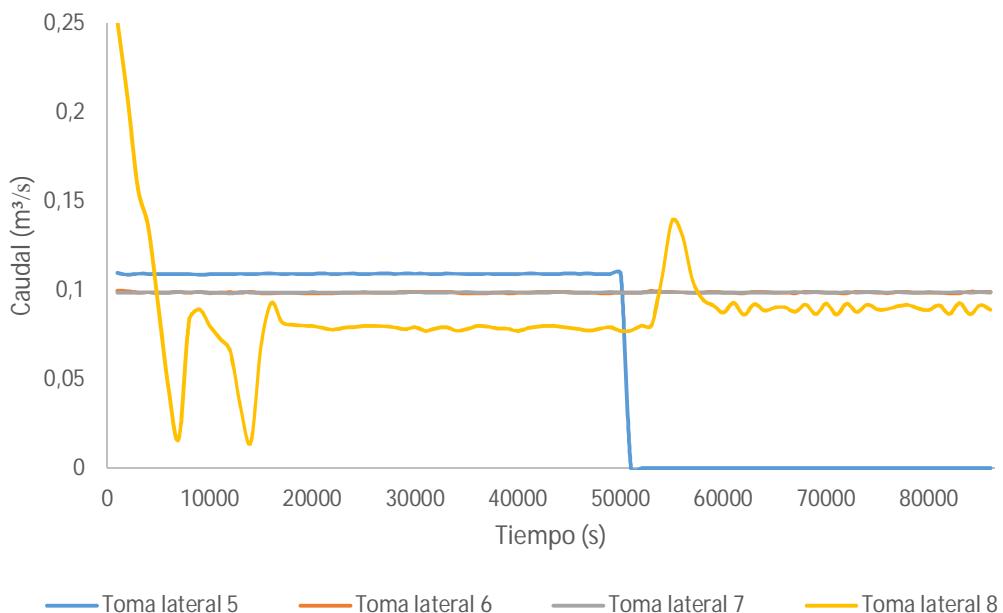


Figura 6.1.7.17 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales 5, 6, 7 y 8 del Test 1 del caso 6

Todos estos resultados expuestos tienen coherencia, pero a su vez pueden ser comparados con los presentados por ASCE [Clemens, 1998]. El objetivo final de este caso es conseguir que cada toma lateral tenga el caudal de extracción deseado en el instante deseado. Para ello vamos a comparar los caudales de extracción obtenidos en las tomas laterales con los obtenidos por ASCE. Resulta evidente que si éstos resultados son similares, corroboran el buen funcionamiento de las compuertas transversales, y por lo tanto del regulador PID. En la *Figura 6.1.7.18* se muestran los caudales de extracción en las tomas laterales presentados por ASCE y en la *Figura 6.1.7.19* se muestran los caudales de extracción de todas las tomas laterales conseguidos con Canalfowmodel. Analizando las dos figuras se puede observar que los resultados son semejantes, la única toma que difiere levemente es la toma lateral 8 que no tiene una extracción constante de caudal pero que approximadamente lo consigue. Todo ello corrobora que el controlador PID de las compuertas transversales implementado en la herramienta de simulación Canalfowmodel cumple con los objetivos marcados en la regulación del canal propuesto.

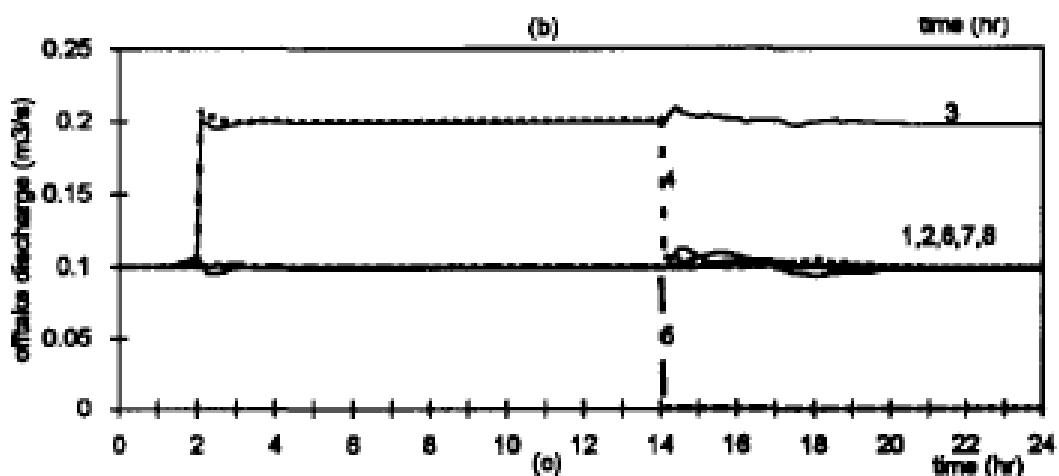


Figura 6.1.7.18 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales de ASCE del Test 1 del caso 6

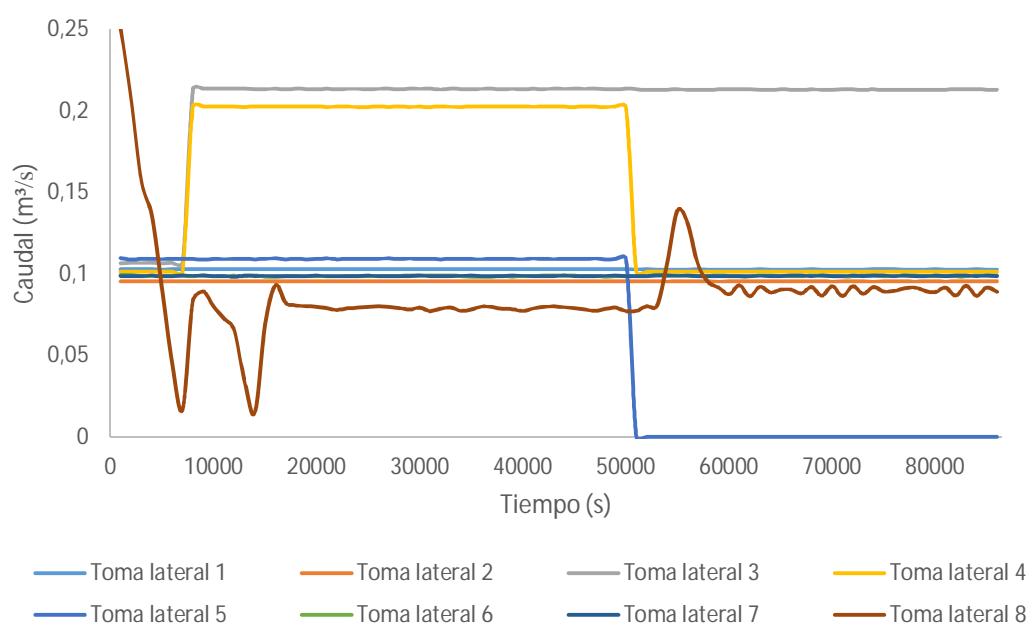


Figura 6.1.7.19 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales del Test 1 del caso 6

6.2 TEST 2

Se puede recrear el test 2 introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: `caso6asce1test2`.

A continuación se presentan todos los datos del Test 2.

6.2.1 Geometría

El canal a simular es exactamente el mismo que el que se ha presentado en el TEST 1 (ver *Tabla 6.1.1.1, Figura 6.1.1.1, Figura 6.1.1.2, Tabla 6.1.1.2*).

6.2.2 Condiciones Iniciales

Como condición inicial se parte de un estado estacionario con caudal constante de $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Estado inicial	$Q_{\text{CONSTANTE}} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$
----------------	---

Tabla 6.2.2 Estado inicial del Test 2 del caso 6

6.2.3 Condiciones de Contorno

- Condiciones de entrada

El caudal de entrada impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 6.2.3* y responde a un hidrograma constante de $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

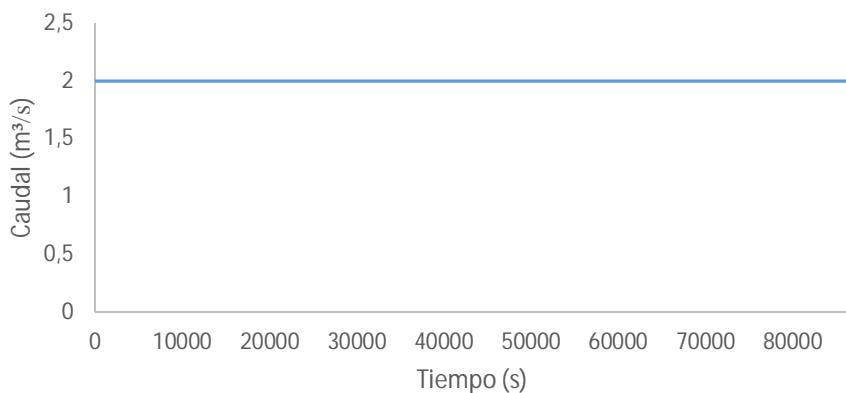


Figura 6.2.3 Hidrograma de entrada del Test 2 del caso 6

- Condiciones de salida

Como condición de contorno aguas abajo se impone salida libre.

Condición de salida	Libre
---------------------	-------

Tabla 6.2.3.1 Condición de salida del Test 2 del caso 6

En una primera aproximación se realizaron simulaciones con esta condición de salida. Dado que la última toma lateral no conseguía alcanzar el caudal de extracción deseado y extraía el caudal de forma muy variable, se decidió modificar la condición de salida. El mayor problema que surge en la última toma lateral es que el caudal sale por la toma conforme va llegando tras su transporte a lo largo del canal, es decir, aguas abajo del canal no tenemos una compuerta transversal que nos remanse el agua y permita que ésta salga por la toma lateral de manera constante. Se observó que al final del canal tenemos una altura más o menos constante de salida alrededor de 0,5 m durante toda la simulación. Poniendo como condición de contorno de salida una altura constante de 0,5 m se consigue que el agua salga del canal de forma constante y dada la cercanía de la última toma lateral al final del canal, también permite extraer de la toma lateral 8 un caudal constante. Así pues la condición de contorno de salida definitiva se muestra en la *Tabla 6.2.3.2*.

Condición de salida	$h(t)=0,5\text{ m}$
---------------------	---------------------

Tabla 6.2.3.2 Condición de salida del Test 2 del caso 6

6.2.4 Compuertas

El número y la posición en el canal de las compuertas transversales y de las tomas laterales es exactamente igual que en el test 1, es decir, tenemos 7 compuertas transversales cuyos datos se pueden ver en la *Tabla 6.1.4.1* (recordar que la compuerta transversal 8 se suprimió) y 8 tomas laterales.

La diferencia de este caso test con el anterior se encuentra en el caudal de extracción de las tomas laterales. Aquí todas ellas han de extraer un caudal de $0,2\text{ m}^3/\text{s}$ excepto la toma lateral 8 que ha de extraer $0,6\text{ m}^3/\text{s}$. Al igual que en el test 1 hay que modelizar la geometría de las tomas laterales para conseguir el caudal de extracción deseado por cada una de ellas.

En la *Tabla 6.2.4.1* se muestran los datos de las tomas laterales en el test 2.

Número de compuerta	1
Posición (m)	95
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,12
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	2
Posición (m)	1.295
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,12
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	3
Posición (m)	1.695
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,14
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	4
Posición (m)	2.495
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,14
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	5
Posición (m)	4.495
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,18
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	6
Posición (m)	6.195
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,2
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	7
Posición (m)	7.795
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,26
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	8
Posición (m)	9.485
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	4,2
Apertura (m)	0,4

Tabla 6.2.4.1 Datos de las tomas laterales del Test 2 del caso 6

6.2.5 Especificaciones para el control

En este test 2 la regulación de los parámetros ha sido también compleja igual que en el test 1 debido a la gran cantidad de compuertas transversales, con alturas objetivo diferentes, a la cantidad de tomas laterales y las variaciones en las extracciones de caudal de las mismas. Los parámetros usados en la simulación y obtenidos como óptimos en este caso realizando varias simulaciones se muestran en la *Tabla 6.2.5*.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 6.2.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 2 del caso 6

6.2.6 Extracciones de caudal en las tomas laterales

A lo largo de la simulación las tomas laterales tienen una extracción de caudal de 0,2 m³/s excepto la toma lateral 8 que tiene una extracción de 0,6 m³/s. En este TEST 2 se introducen más variaciones en la extracción de caudal que en el TEST 1 para observar si el regulador PID funciona correctamente regulando las compuertas transversales. Las variaciones experimentadas a lo largo de la simulación se muestran en la *Tabla 6.2.6* y en la *Figura 6.2.6*.

Número de toma lateral	Caudal de extracción inicial tomas laterales (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 2 h del inicio de la simulación (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 14 h del inicio de la simulación (m ³ /s)
1	0,2	0,2	0,2
2	0,2	0	0,2
3	0,2	0,4	0,2
4	0,2	0	0,2
5	0,2	0	0,2
6	0,2	0,3	0,2
7	0,2	0,2	0,2
8	0,6	0,9	0,6

Tabla 6.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso 6

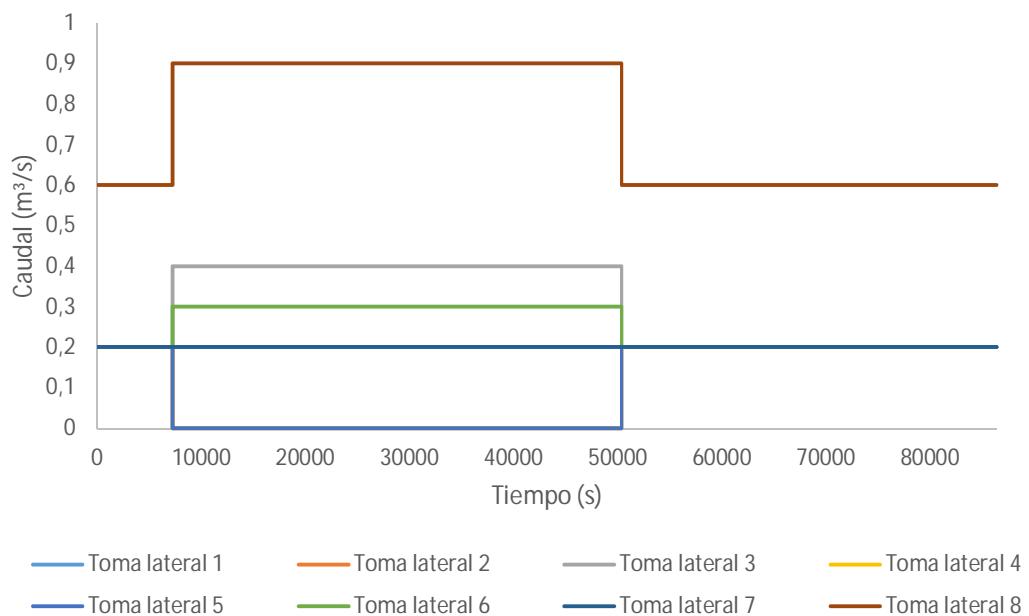


Figura 6.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso 6

6.2.7 Resultado de la simulación

En la *Figura 6.2.7.1* se muestra la evolución temporal del error de masa, que al igual que en el test 1 se observa que es 0 durante toda la simulación.

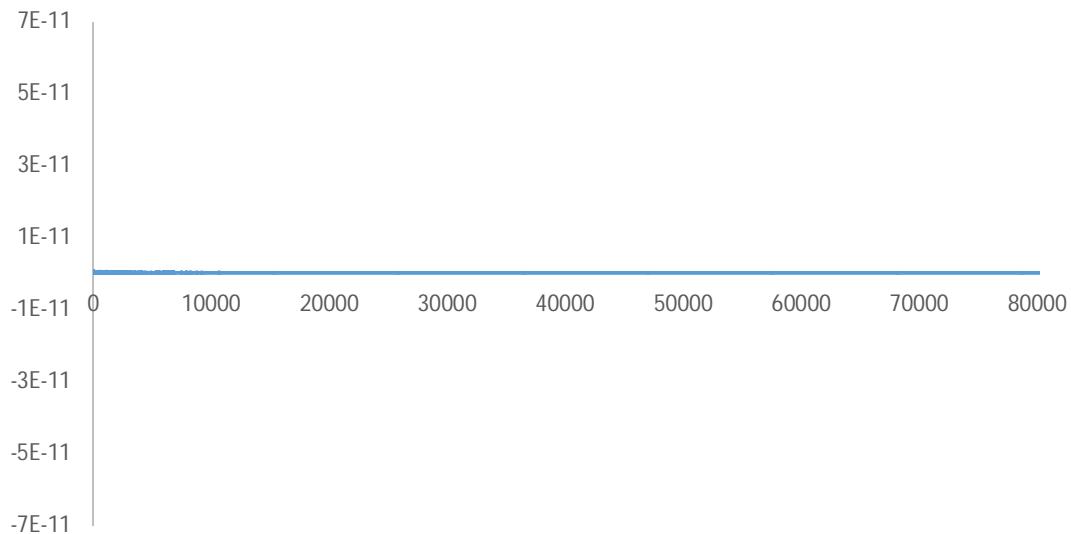


Figura 6.2.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 2 del caso 6

En la *Figura 6.2.7.2* se muestra la evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja). El caudal de entrada se ajusta al hidrograma de entrada de la *Figura 6.2.3*. Respecto al caudal de salida, ocurre lo mismo que en el test 1, es decir, que el caudal de entrada se extrae totalmente por las tomas laterales, con lo cual el caudal de salida del canal debería ser 0 a lo largo de toda la simulación. Si analizamos el caudal de salida (naranja) vemos que al principio de la simulación extrae 0,8 m³/s aproximadamente y tarda unos 4.000 s en llegar al caudal de salida 0, esto es debido a que en las condiciones iniciales del caso hemos supuesto un caudal de 2 m³/s, y al igual que en el test 1 tarda un tiempo en desalojar el agua sobrante. Una vez desalojada el agua sobrante el caudal de salida se mantiene constante hasta el final de la simulación con un valor de 0 m³/s.

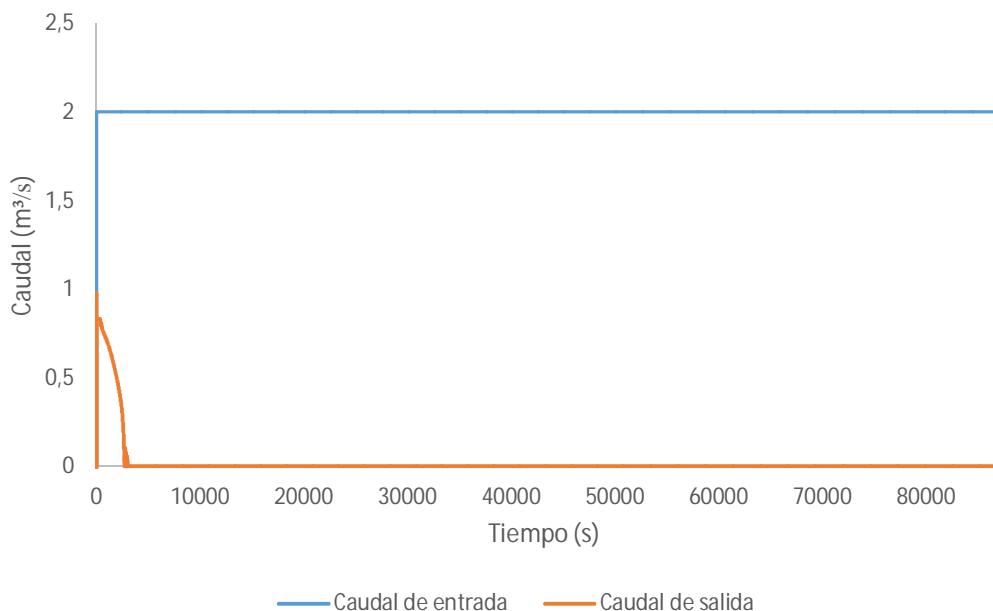


Figura 6.2.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 2 del caso 6

En la *Figura 6.2.7.3* se muestra un perfil longitudinal del canal en $T=4.000$ s. En este instante de tiempo aún no se ha producido ninguna variación en las extracciones de caudal de las tomas laterales, con lo cual todas extraen $0,2\text{ m}^3/\text{s}$ y la toma lateral 8 extrae $0,6\text{ m}^3/\text{s}$. A su vez ya ha pasado tiempo suficiente para desalojar el agua sobrante de la condición inicial. Podemos observar como al final de cada tramo el agua se encuentra remansada gracias a las compuertas transversales. Esto permite que las tomas laterales extraigan el caudal deseado. También podemos ver como en el tramo 8 tenemos una altura constante de $0,5\text{ m}$ gracias a la condición de contorno de salida.

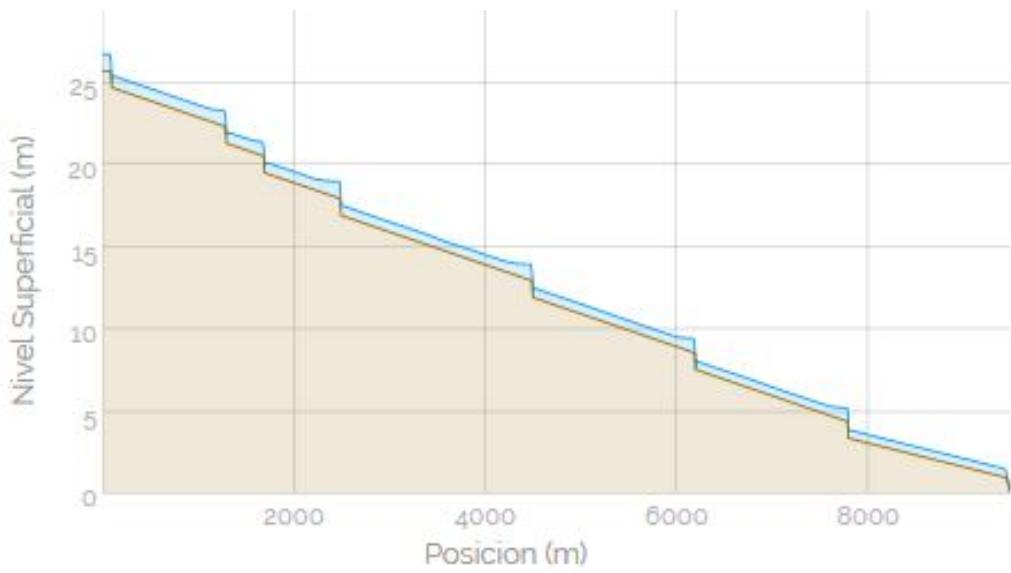


Figura 6.2.7.3 Perfil longitudinal del canal en $T=4.000$ s del Test 2 del caso 6

En la *Figura 6.2.7.4* se muestra un perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=4.000$ s. Al principio del canal tenemos $2 \text{ m}^3/\text{s}$, a los 95 m tenemos la primera toma lateral que desaloja un caudal de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ con lo que el caudal del canal desciende hasta $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Se mantiene constante hasta que alcanza la siguiente toma lateral situada a 1.295 m , ésta también extrae $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, con lo cual el caudal del canal desciende hasta $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Si seguimos el recorrido a lo largo de todo el canal se va extrayendo $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en cada toma lateral hasta que la toma lateral 8 extrae los $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ restantes. Con lo cual obtenemos un caudal de salida de $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

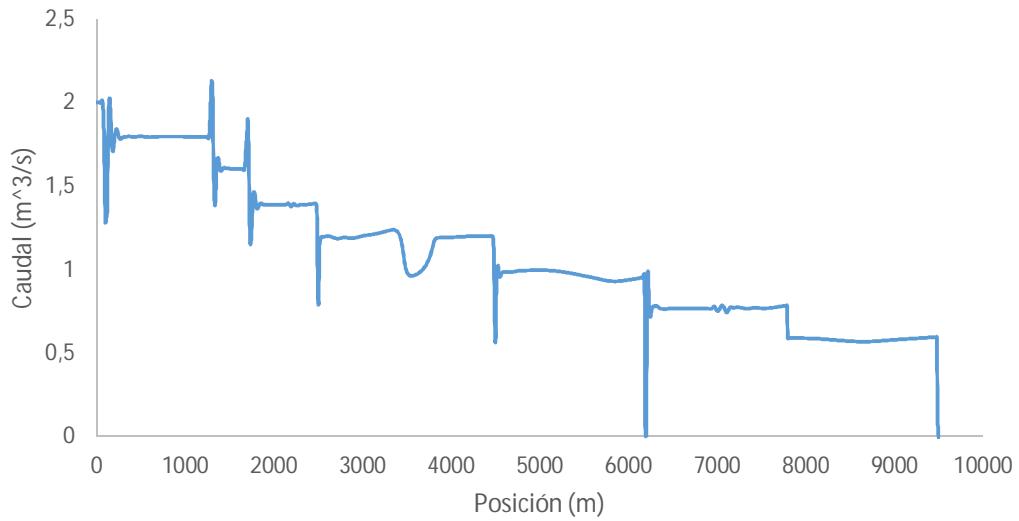


Figura 6.2.7.4 Perfil longitudinal de caudal en $T=4.000$ s del Test 2 del caso 6

En la *Figura 6.2.7.5* se muestra el perfil de caudal que hay a lo largo del canal en $T=37.000$ s. Ocurre lo mismo que lo descrito anteriormente en $T=4.000$ s pero con la diferencia de que las extracciones de caudal en las tomas laterales han sufrido variaciones. Las tomas laterales 2, 4 y 5 ahora están cerradas y no extraen caudal. La toma lateral 3 extrae el doble de caudal, es decir, $0,4$ m^3/s . La toma lateral 6 extrae $0,3$ m^3/s . La toma lateral 8 extrae $0,9$ m^3/s y las tomas laterales 1 y 7 no han sufrido variación.

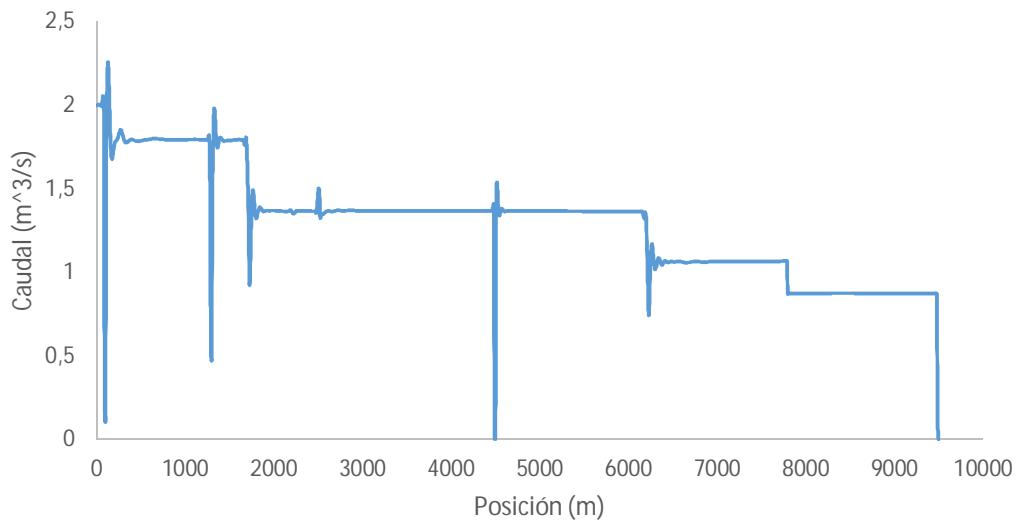


Figura 6.2.7.5 Perfil longitudinal de caudal en $T=37.000$ s del Test 2 del caso 6

Por último, en la *Figura 6.2.7.6* se muestra el perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=85.000$ s. Las tomas laterales han recuperado los valores de las extracciones de caudal iniciales y por lo tanto el caudal a lo largo del canal es semejante al de la *Figura 6.2.7.4*.

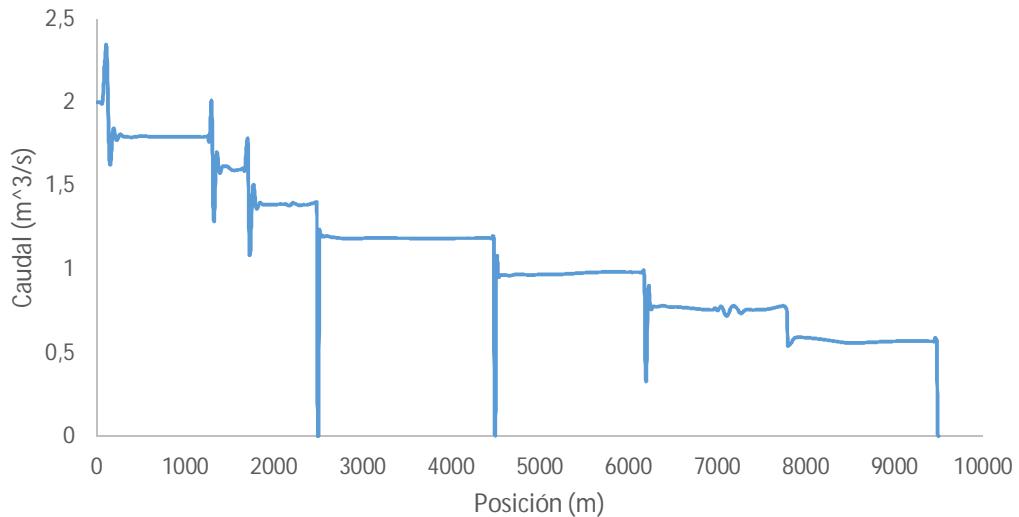


Figura 6.2.7.6 Perfil longitudinal de caudal en $T=85.000$ s del Test 2 del caso 6

Hemos comprobado también en este test como los caudales dentro del canal concuerdan con los resultados esperados, esto debe ser corroborado a la hora de examinar el funcionamiento de las compuertas transversales y de las tomas laterales. Para examinar las compuertas transversales se muestra cada compuerta por separado para poder observar con más claridad los resultados. Desde la *Figura 6.2.7.7* hasta la *Figura 6.2.7.13* se observan las aperturas de cada compuerta (azul), el nivel superficial del agua antes de cada compuerta (naranja) y la altura objetivo (gris). En este test 2 las compuertas transversales no tienen comportamientos tan semejantes como los dados en el test 1, hay compuertas que realizan aperturas mayores para dejar paso al agua como las compuertas 1, 3 y 6 y otras que realizan aperturas menores como la 2, 4 y 7. La compuerta transversal 1 tiene una aperturas continuas entre 0 y 0,4 m, la compuerta transversal 3 es la que alcanza las mayores aperturas superando 1 m de apertura y la compuerta 6 oscila entre 0 y 0,6 m de apertura. Por el contrario la compuerta transversal 2 tiene unas aperturas constantes entre 0 y 0,3 m, la compuerta transversal 4 entre 0 y 0,1 m y la compuerta transversal 7 es la más constante y se mantiene entre 0,2 y 0,3 m. Todas ellas tienen en común que están actuando constantemente. La única compuerta transversal que difiere es la compuerta transversal 7 que mantiene sus aperturas estables y esto es debido a la altura constante impuesta como condición de contorno de salida. Respecto a las alturas objetivo vemos que todas las compuertas consiguen mantener el nivel superficial de su tramo cercano a lo deseado, aunque no sea constante, excepto la compuerta transversal 7 que por el motivo citado anteriormente consigue alcanzar su altura objetivo de forma más estable que las otras

compuertas transversales. Es difícil conseguir un nivel superficial en cada tramo constante debido a la cantidad de tomas laterales, compuertas transversales, variaciones en las condiciones de entrada y variaciones en las extracciones de las tomas laterales, pero se consigue acercarse lo máximo posible a las alturas objetivo.

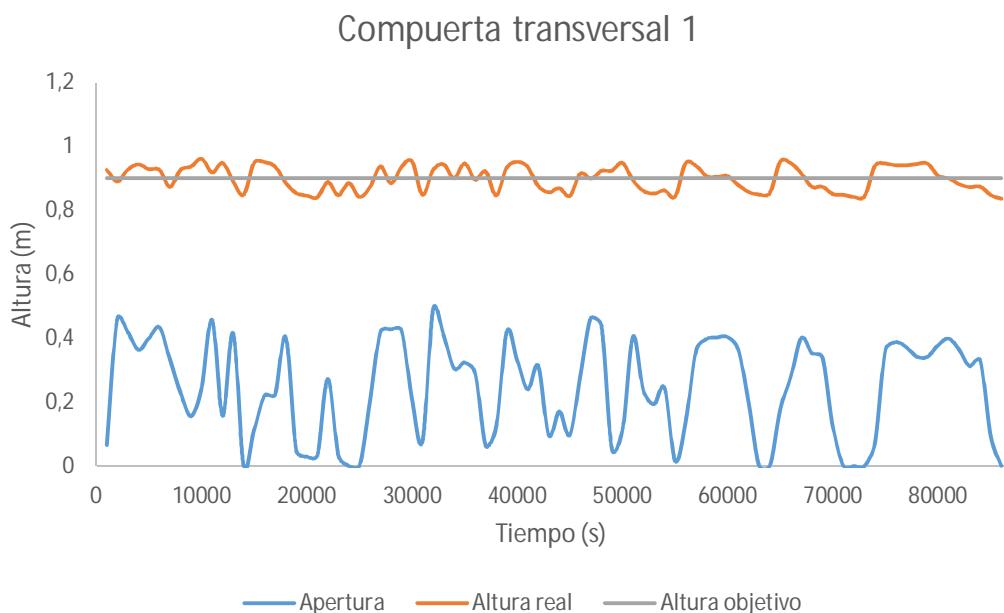


Figura 6.2.7.7 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 2 del caso 6

Compuerta transversal 2

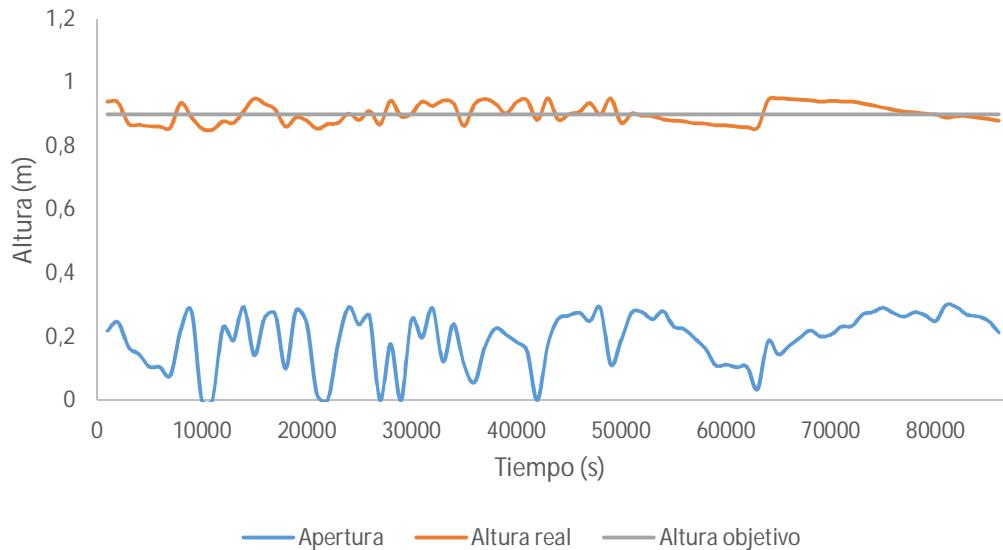


Figura 6.2.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 2 del caso 6

Compuerta transversal 3

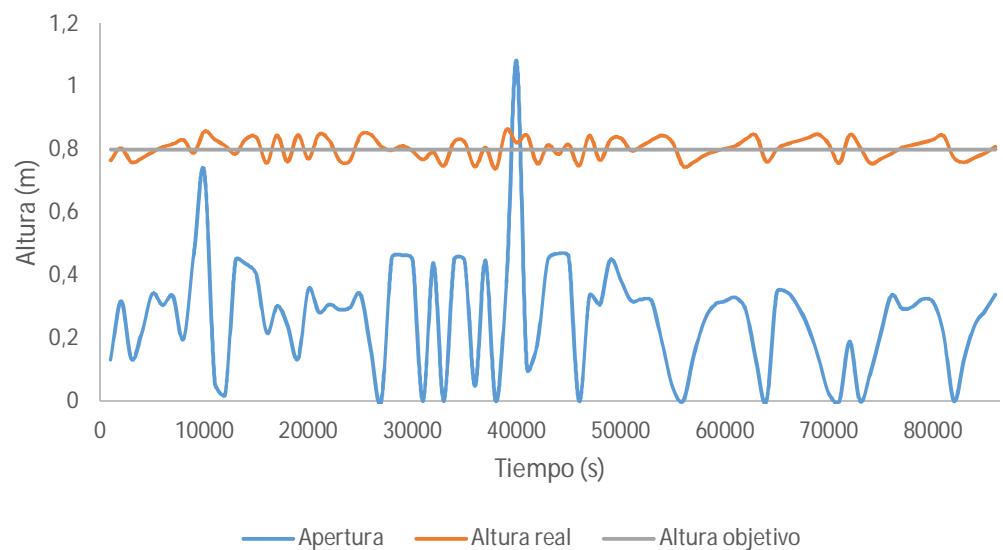


Figura 6.2.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 2 del caso 6

Compuerta transversal 4

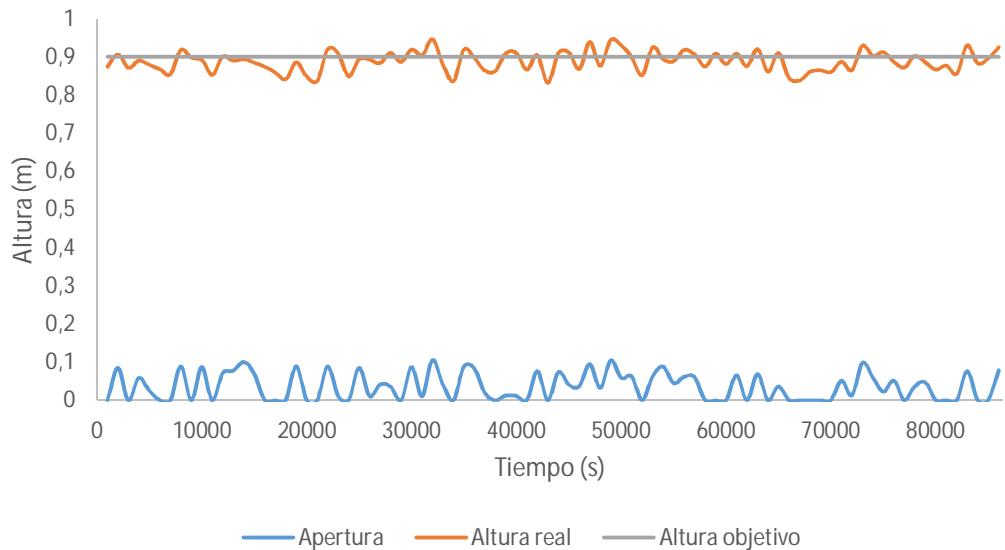


Figura 6.2.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 2 del caso 6

Compuerta transversal 5

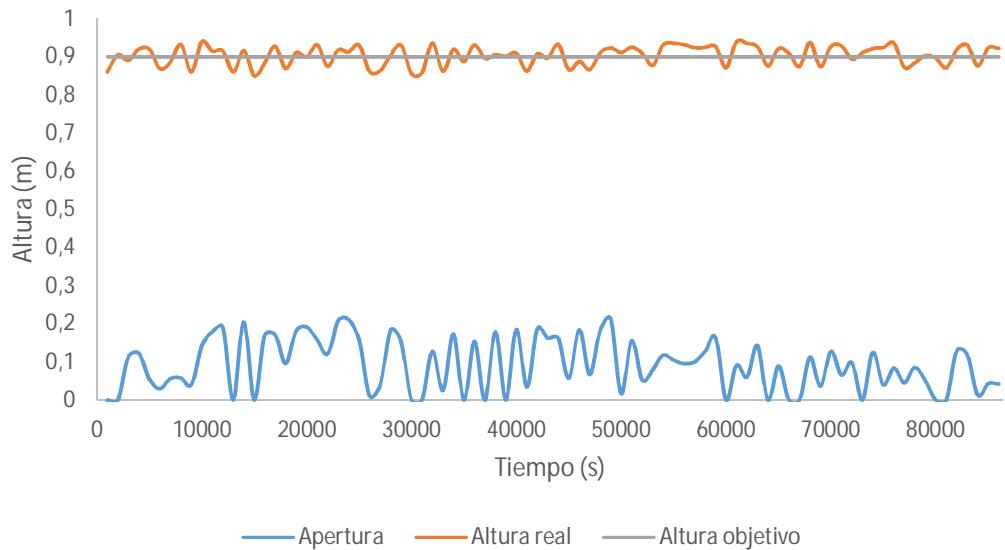


Figura 6.2.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 2 del caso 6

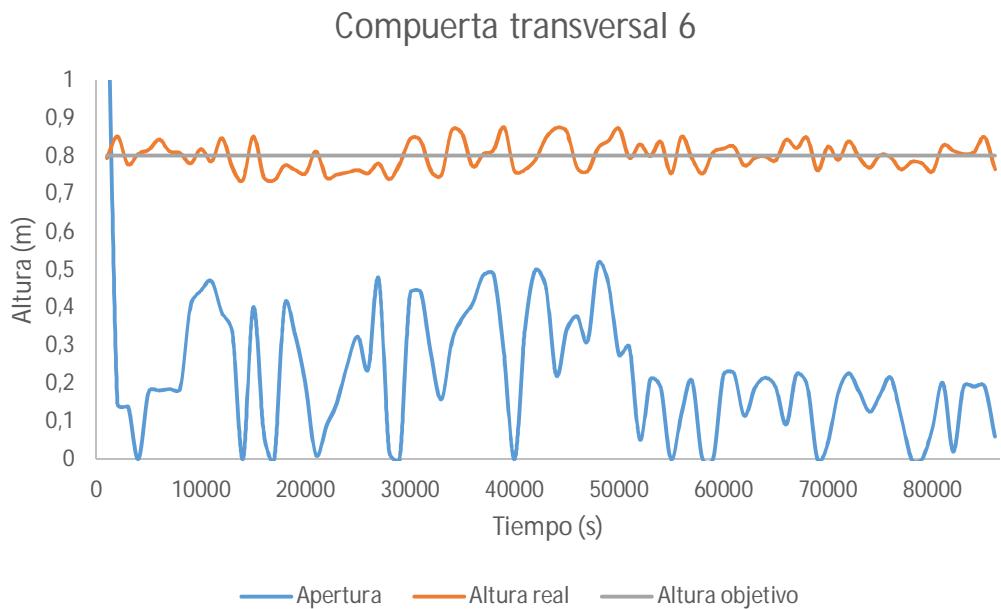


Figura 6.2.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 2 del caso 6

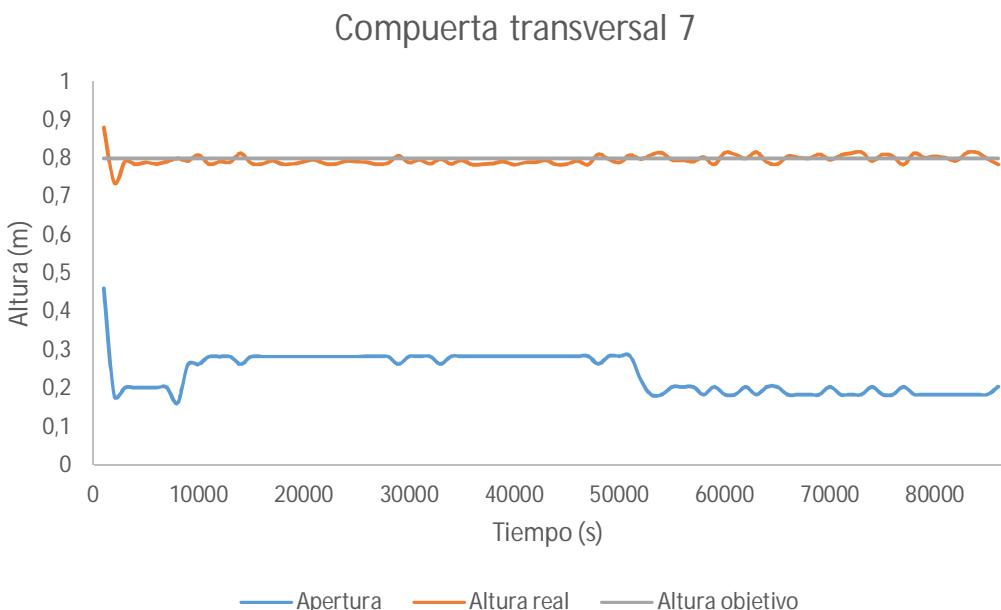


Figura 6.2.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 2 del caso 6

Por último queda por analizar el comportamiento de las tomas laterales. En la *Figura 6.2.7.14* se pueden ver las aperturas de todas las tomas laterales. Se observa como a las 2 h (7.200 s) del comienzo de la simulación se produce una variación en la apertura de varias tomas laterales. Estas permanecen constantes hasta que nuevamente pasadas 14 h (50.400 s) desde el inicio de la simulación vuelven a recuperar los valores de extracción de caudal iniciales.

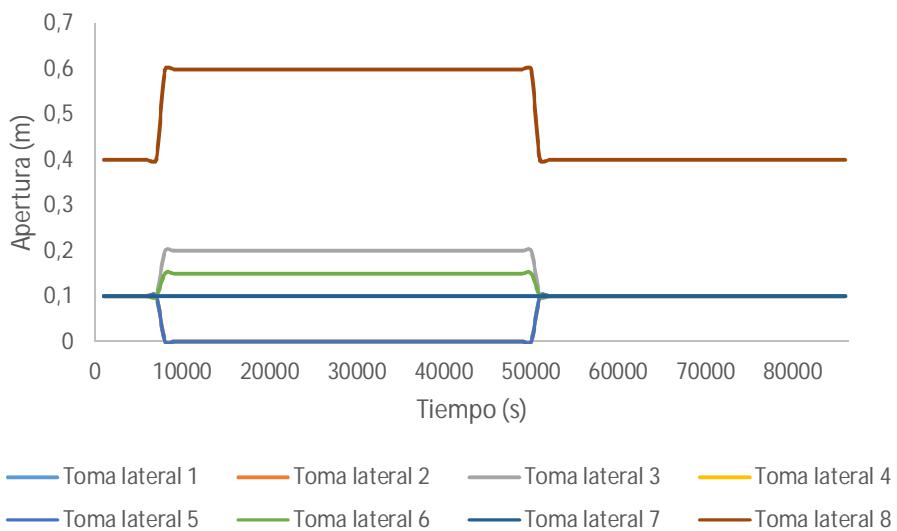


Figura 6.2.7.14 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 2 del caso 6

Al igual que en el test 1 se representan los caudales de extracción de las tomas laterales en dos Figuras. En la *Figura 6.2.7.15* se ven las 4 primeras tomas laterales y en la *Figura 6.2.7.16* se ven las 4 últimas tomas laterales. En la *Figura 6.2.7.15* podemos ver como la toma lateral 1 (azul) extrae un caudal constante de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ a lo largo de toda la simulación. Las tomas laterales 2 y 4 (naranja y amarillo) parten con una extracción de caudal de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y pasadas 2 h (7.200 s) se cierran totalmente, con lo cual estas dos tomas no extraen caudal. A las 14 h (50.400 s) vuelven a abrirse consiguiendo nuevamente una extracción de caudal de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Por último la toma lateral 3 (gris) parte con una extracción de caudal de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y pasadas 2 h (7.200 s) se duplica esta extracción alcanzando los $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Se mantiene constante esta extracción de caudal hasta que a las 14 h (50.400 s) disminuye la apertura de la toma lateral volviendo a extraer $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el final de la simulación.

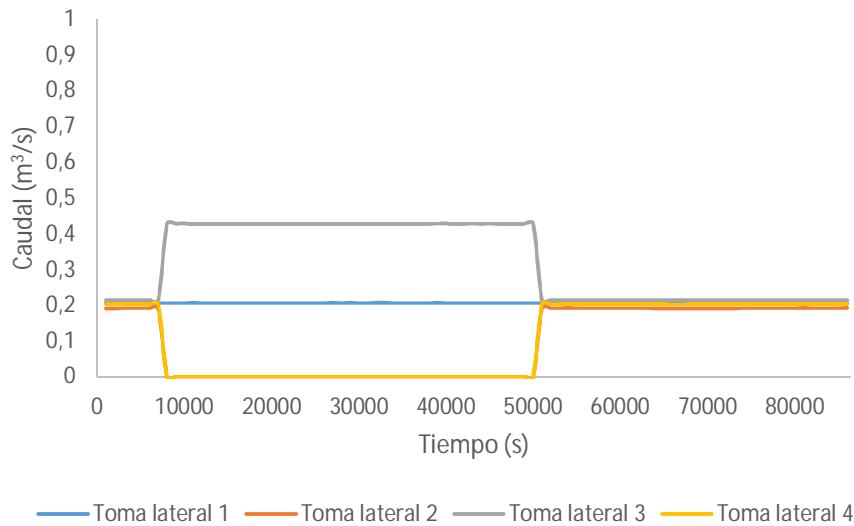


Figura 6.2.7.15 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 1, 2, 3 y 4 del Test 2 del caso 6

En la Figura 6.2.7.16 podemos ver como la toma lateral 5 (azul) extrae $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta que pasadas 2 h (7.200 s) se cierra totalmente y no permite extracción de caudal. A las 14 h (50.400 s) de simulación se vuelve a abrir la toma lateral volviendo a extraer $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. La toma lateral 6 (naranja) también parte con una extracción de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. A las 2 h (7.200 s) aumenta su apertura y extrae $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta pasadas 12 h que vuelve a extraer el caudal inicial, es decir, $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. La toma lateral 7 (gris) tienen una extracción constante de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. La toma lateral 8 (amarillo), igual que ocurría en el test 1, es la más conflictiva. En los primeros instantes debe evacuar todo el caudal sobrante con el que partíamos en la simulación, pasado este primer tramo consigue tener una extracción más o menos constante de cerca de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$. A las 2 h (7.200 s) aumenta su apertura y extrae $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta que a las 14 h (50.400 s) vuelve a variar su extracción volviendo a los valores iniciales, es decir $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$. La toma lateral 8 no extrae el caudal de forma tan estable como el resto de las tomas laterales, sino que fluctúa levemente alrededor del caudal deseado. De todas formas gracias a la modificación de la condición de salida se ha conseguido mejorar la estabilidad en la extracción de caudal de la toma lateral 8 respecto al test 1. Si comparamos los caudales de extracción reales de las tomas laterales con los caudales de extracción deseados (ver Figura 6.2.6) vemos que los resultados son semejantes.

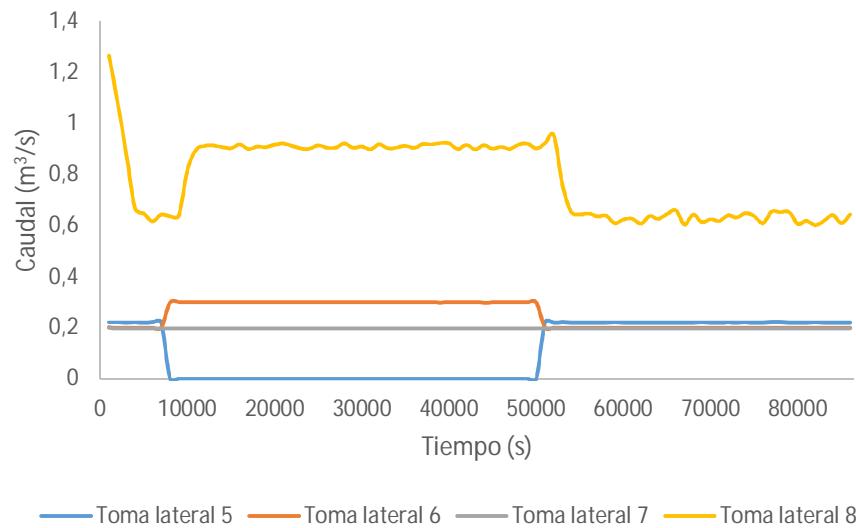


Figura 6.2.7.16 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 5, 6, 7 y 8 del Test 2 del caso 6

En este test 2 se viene a ratificar lo ya conseguido en el test 1. Hemos partido de la misma geometría que en el test 1 pero se ha aumentado la cantidad de variaciones en las extracciones de caudal de las tomas laterales. Ante el aumento de la complejidad en el caso hemos visto que el regulador PID actúa correctamente para adecuarse a todos los cambios sufridos, consiguiendo que todas las compuertas transversales alcancen sus alturas objetivo y por tanto, que todas las tomas laterales extraigan el caudal deseado.

7 CASO 7: CANAL DE ANCHURA VARIABLE, SECCIÓN TRAPEZOIDAL, CON PENDIENTE SUAVE

7.1 TEST 1

Se puede recrear el test 1 introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: *caso7asce2test1*.

A continuación se presentan todos los datos del test 1.

7.1.1 Geometría

El canal a simular tiene una geometría ya definida previamente por ASCE [Clemens, 1998]. Su longitud es de 28.000 m y una pendiente lateral de 1,5 m/m. Su sección transversal tiene forma trapezoidal con dimensiones variables en cada sección. El canal a lo largo de toda su longitud posee una pendiente constante de 0,0001 m/m. El coeficiente de rozamiento de Manning es $0,02 \text{ s/m}^{1/3}$ y la simulación tiene una duración de 24 h (86.400 s) (ver *Tabla 7.1.1.1*).

Longitud (m)	28.000
Coeficiente de Manning (s/m^{1/3})	0,02
Ángulo de inclinación (m/m)	0,0001

Tabla 7.1.1.1 Datos geométricos del Test 1 del caso 7

El perfil longitudinal del canal se puede observar en la *Figura 7.1.1.1*, donde se ve la longitud total del canal, la longitud de cada tramo, y la pendiente constante de todo el canal, gráficamente se aprecia que el canal consta de una pendiente suave. Se parte de una altura inicial de 4,4 m.

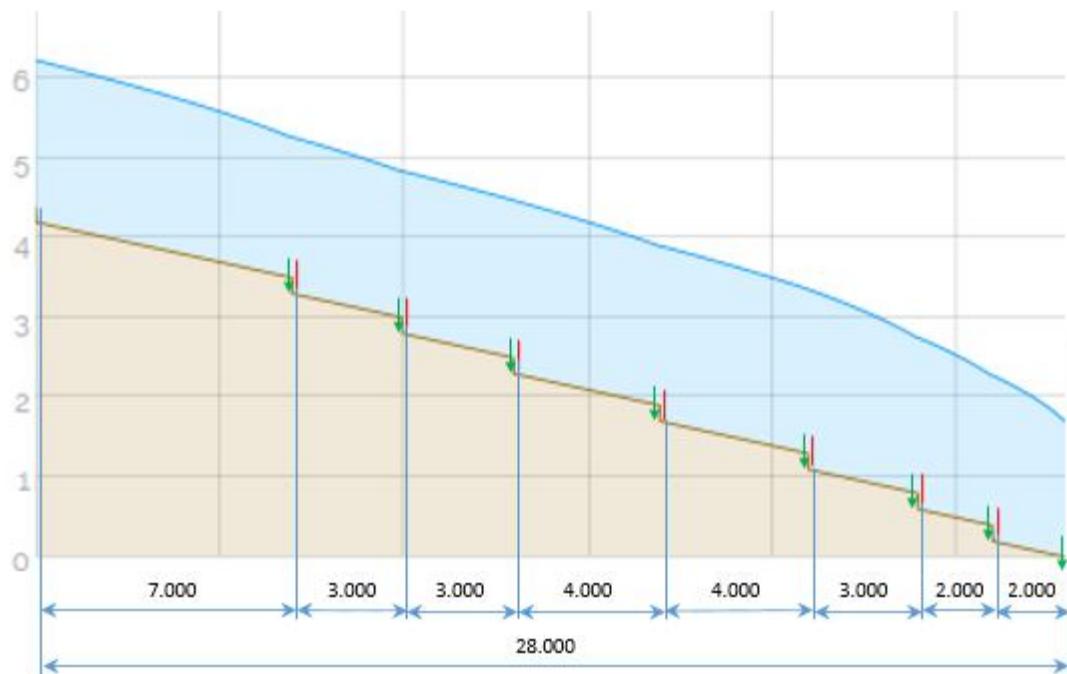


Figura 7.1.1.1 Perfil longitudinal en m del canal del Test 1 del caso 7

Al final de cada tramo tenemos una compuerta transversal (rojo), para facilitar el paso del agua en estos puntos tenemos escalones de altura 0,2 m en cada cambio de tramo. En la parte final del canal tenemos una pared (negro) que nos permite almacenar el agua en el último tramo. A su vez tenemos una bomba de extracción y de adicción de caudal para poder controlar el nivel superficial del agua en este tramo.

La geometría de cada sección queda definida bajo la geometría de la *Figura 7.1.1.2*, pero para cada sección el ancho del fondo y la profundidad del canal varían según la *Tabla 7.1.1.2*.

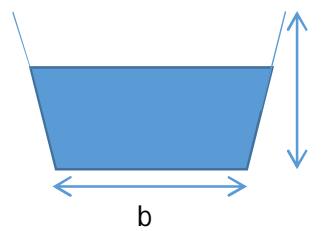


Figura 7.1.1.2 Sección transversal del canal del Test 1 del caso 7

A continuación se presenta la *Tabla 7.1.1.2* con todas las medidas de cada tramo.

Tramos	Longitud piscina (m)	Ancho del fondo b (m)	Profundidad del canal I (m)
1	7.000	7	2,5
2	3.000	7	2,5
3	3.000	7	2,5
4	4.000	6	2,3
5	4.000	6	2,3
6	3.000	5	1,9
7	2.000	5	1,9
8	2.000	5	1,9

Tabla 7.1.1.2 Datos geométricos de las secciones del Test 1 del caso 7

7.1.2 Condiciones Iniciales

Como condición inicial se parte de un estacionario de caudal constante de $11 \text{ m}^3/\text{s}$.

Estado inicial	$Q_{\text{CONSTANTE}}=11 \text{ m}^3/\text{s}$
<i>Tabla 7.1.2 Estado inicial del Test 1 del caso 7</i>	

7.1.3 Condiciones de Contorno

- Condiciones de entrada

El caudal impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 7.1.3* y responde a un hidrograma variable. Durante las dos primeras horas (7.200 s) tenemos un caudal de $11 \text{ m}^3/\text{s}$, pasadas estas dos primeras horas aumenta el caudal de entrada hasta $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y permanece constante durante 12 h, hasta las 14 h (50.400 s) desde el inicio de la simulación. Aquí vuelve a disminuir el caudal de entrada hasta $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y ya se mantiene constante este caudal hasta el final de la simulación.

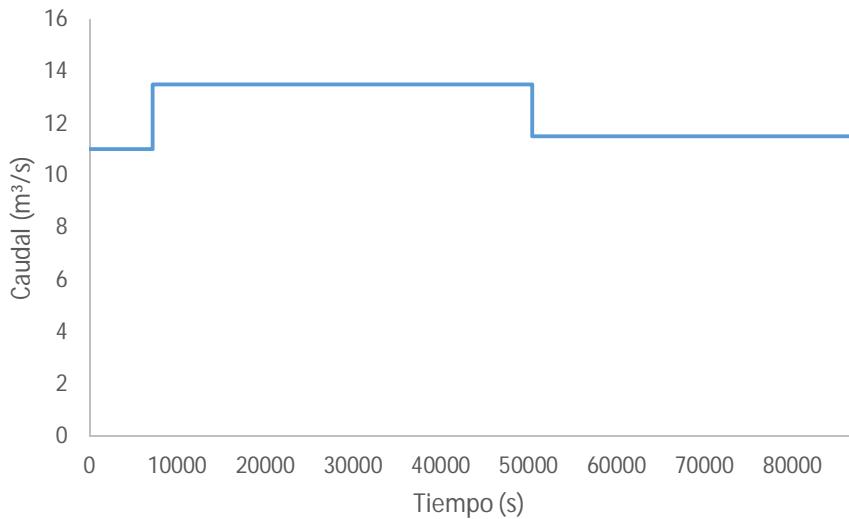


Figura 7.1.3 Hidrograma de entrada del Test 1 del caso 7

- Condiciones de salida

Como condición de contorno aguas abajo se impone una altura constante dada por ASCE de 1,7 m. Esta altura será regulada por la bomba colocada al final del canal que permite extraer e introducir caudal según sea necesario.

Condición de salida	$h(t)=1,7 \text{ m}$
Tabla 7.1.3 Condición de salida del Test 1 del caso 7	

7.1.4 Compuertas

En este caso tenemos 8 compuertas transversales y 8 tomas laterales. Las compuertas transversales se encuentran todas al final de cada tramo excepto en el tramo 8 que no tenemos compuerta transversal. Al final de este último tramo el único elemento de regulación de caudal es una bomba de extracción, que nos permitirá extraer el caudal sobrante hasta conseguir la condición de salida de altura constante de 1,7 m. La compuerta transversal 1 se encuentra al comienzo del canal, su función principal es la de regular el caudal de entrada al canal, dado que esta condición ya se la introducimos a través de las condiciones de entrada, esta compuerta transversal es prescindible y por lo tanto se elimina del caso. Así pues tendremos 7 compuertas transversales. Todas ellas tienen unas alturas objetivo entre 1,7 y 2,1 m dependiendo de la compuerta.

Los datos de las compuertas transversales quedan bien explicados en la *Tabla 7.1.4.1.*

Número de compuerta	1
Posición (m)	7.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	2,1
Número de compuerta	2
Posición (m)	10.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	2,1
Número de compuerta	3
Posición (m)	13.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	2,1
Número de compuerta	4
Posición (m)	17.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	1,9
Número de compuerta	5
Posición (m)	21.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	1,9
Número de compuerta	6
Posición (m)	24.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	1,7

Número de compuerta	7
Posición (m)	26.000
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	1,7

Tabla 7.1.4.1 Compuertas transversales de regulación automática del Test 1 del caso 7

Todas las tomas laterales se encuentran 5 m aguas arriba de las compuertas transversales y todas ellas han de extraer un caudal de 1 m³/s. La toma lateral 8 debido al problema numérico mencionado en el caso 6 se colocó a una distancia de 27.900 m desde el inicio del canal para así estar fuera de la última celda de cálculo. Igual que en el caso 6 se realizaron varias simulaciones para dar con la geometría adecuada que consiguiera extraer 1 m³/s por cada toma lateral.

A continuación se muestran los datos de las tomas laterales en la *Tabla 7.1.4.2*.

Número de compuerta	1
Posición (m)	6.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,44
Apertura (m)	0,3
Número de compuerta	2
Posición (m)	9.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,46
Apertura (m)	0,3
Número de compuerta	3
Posición (m)	12.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,49
Apertura (m)	0,3
Número de compuerta	4
Posición (m)	16.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,54
Apertura (m)	0,3

Número de compuerta	5
Posición (m)	20.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,6
Apertura (m)	0,3
Número de compuerta	6
Posición (m)	23.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,67
Apertura (m)	0,3
Número de compuerta	7
Posición (m)	25.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,75
Apertura (m)	0,3
Número de compuerta	8
Posición (m)	27.900
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,77
Apertura (m)	0,3

Tabla 7.1.4.2 Datos de las tomas laterales del Test 1 del caso 7

7.1.5 Especificaciones para el control

Para este caso, se encontraron unos parámetros que permitían obtener la simulación lo más estable posible. Los parámetros obtenidos se muestran en la *Tabla 7.1.5*.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 7.1.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 1 del caso 7

7.1.6 Extracciones de caudal en las tomas laterales

Inicialmente, las tomas laterales tienen una extracción de caudal de 1 m³/s. Para hacer el caso más complejo y observar si el regulador PID funciona correctamente regulando las compuertas transversales se introducen variaciones en la extracción de caudal de las tomas laterales. Pasadas dos horas del comienzo de la simulación la toma lateral 5 aumenta su extracción hasta 2,5 m³/s y se mantiene constante hasta el final de la simulación. La toma lateral 6 a las 2 h de simulación, aumenta su extracción hasta 2 m³/s durante 12 h. A las 14 h de simulación, la toma lateral 6 se cierra totalmente hasta el final de la simulación. Las variaciones sufridas a lo largo de la simulación se muestran en la *Tabla 7.1.6* y en la *Figura 7.1.6*.

Número de toma lateral	Caudal de extracción inicial tomas laterales (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 2 h del inicio de la simulación (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 14 h del inicio de la simulación (m ³ /s)
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	2,5	2,5
6	1	2	0
7	1	1	1
8	1	1	1

Tabla 7.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 7

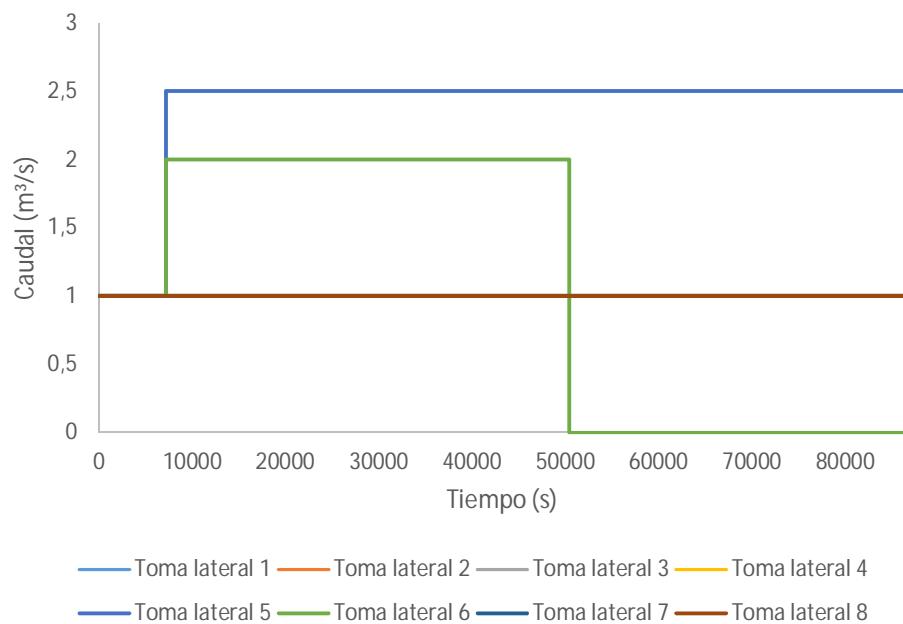


Figura 7.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 7

7.1.7 Resultado de la simulación

Estos resultados que se presentan a continuación del test 1 corresponden a la última simulación realizada con éxito, donde todos los resultados daban lo esperado. Para llegar hasta este resultado hubo que realizar aproximadamente 20 simulaciones, modificando y comprobando muchos datos, encontrando la geometría adecuada de cada toma lateral, eliminando elementos de las celdas conflictivas, encontrando los parámetros óptimos del regulador PID y variando los caudales de las tomas laterales.

En la *Figura 7.1.7.1* se muestra la evolución temporal del error de masa cometido en la simulación. Este dato nos proporciona información sobre la relación que hay entre el agua que entra en el canal, el agua que es transportada por el canal y el agua que sale.

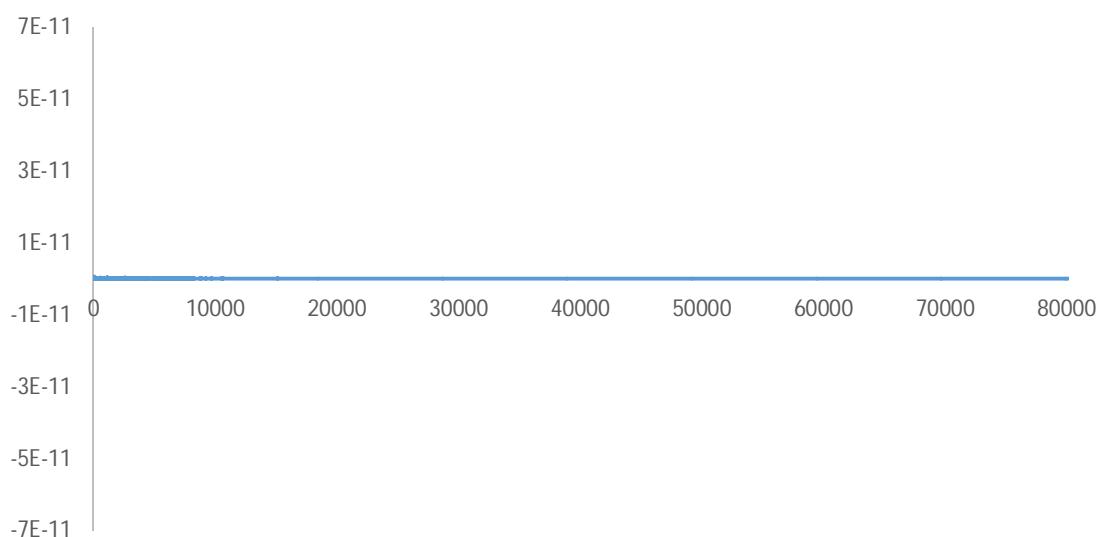


Figura 7.1.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 1 del caso 7

En la *Figura 7.1.7.2* se muestra la evolución temporal de los caudales de entrada (línea azul) y salida (línea naranja) del canal. El caudal de entrada se ajusta al hidrograma de entrada de la *Figura 7.1.3*. Si analizamos el caudal de salida (naranja) vemos que al principio de la simulación extrae 10 m³/s aproximadamente, esto es debido a que tiene que extraer el caudal sobrante introducido como condición inicial. Vemos cómo va desalojando este caudal hasta que llega un punto donde el caudal toma valores negativos. Este dato tiene una explicación numérica y tiene que ver con la condición de salida impuesta. Numéricamente, estos valores negativos indican que no alcanzamos la altura de 1,7 m y que por lo tanto necesitaríamos un aporte de caudal. Realmente, en este caso, tenemos una bomba que nos permitiría extraer el caudal sobrante para conseguir esta altura, pero también necesitaríamos otra bomba que aportara caudal al canal para conseguir la altura de 1,7 m.

Pasada esta zona de valores negativos (entre 5.500 s y 7.200 s aproximadamente) el caudal de salida vuelve a ser positivo pero inmediatamente se produce la variación en la extracción de las tomas laterales (7.200 s) y el caudal de salida vuelve a valores negativos. A partir de 15.000 s aproximadamente desde el inicio de la simulación el canal alcanza un estado estacionario, teniendo una caudal de salida constante de 3 m³/s. Si analizamos el caudal de entrada en este tramo (13,5 m³/s) y el caudal que se extrae por todas las tomas laterales (10,5 m³/s) vemos que el caudal de salida es correcto. A las 14 h (50.400 s) del inicio de la simulación hay una variación en la extracción de caudal de 1 toma lateral, esto provoca que el agua se transporte a lo largo de todo el canal y no salga por las tomas laterales. En cuanto se regula de nuevo la situación, en unos 8.000 s, el caudal de salida vuelve a ser 3 m³/s y así se mantiene hasta el final de la simulación.

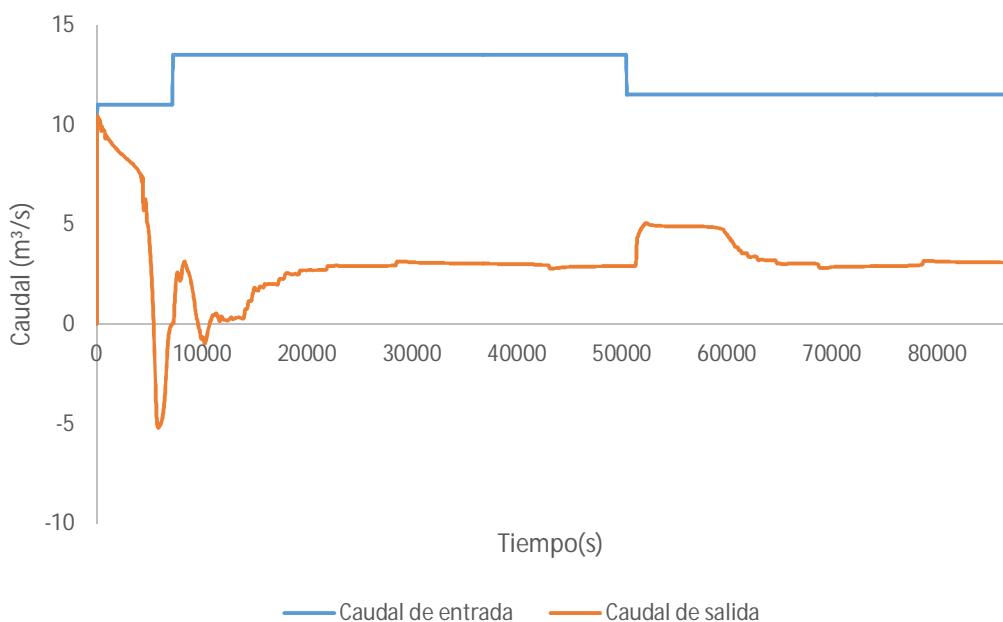


Figura 7.1.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 1 del caso 7

En la Figura 7.1.7.3 se ve un perfil longitudinal del canal en T=0. Podemos ver la condición inicial introducida (Tabla 7.1.2). Todo el canal tiene un caudal de 11 m³/s. A su vez también se muestra la geometría del canal, con su suave pendiente y el escalón de 0,2 m que hay entre cada tramo.

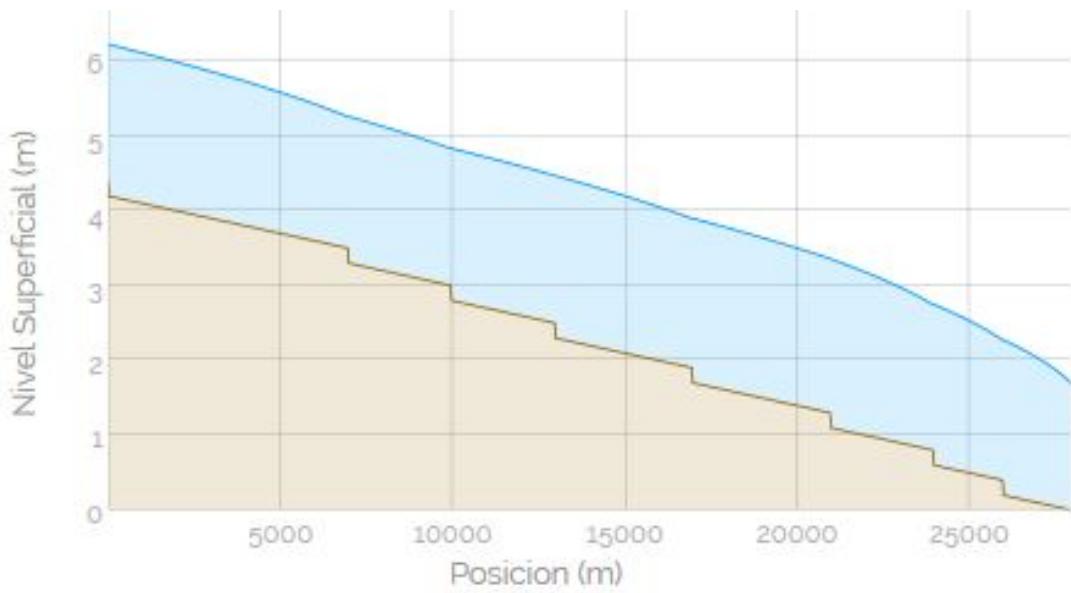


Figura 7.1.7.3 Perfil longitudinal del canal en $T=0$ s del Test 1 del caso 7

En la Figura 7.1.7.4 se ve un perfil longitudinal del canal en $T=30.000$ s.

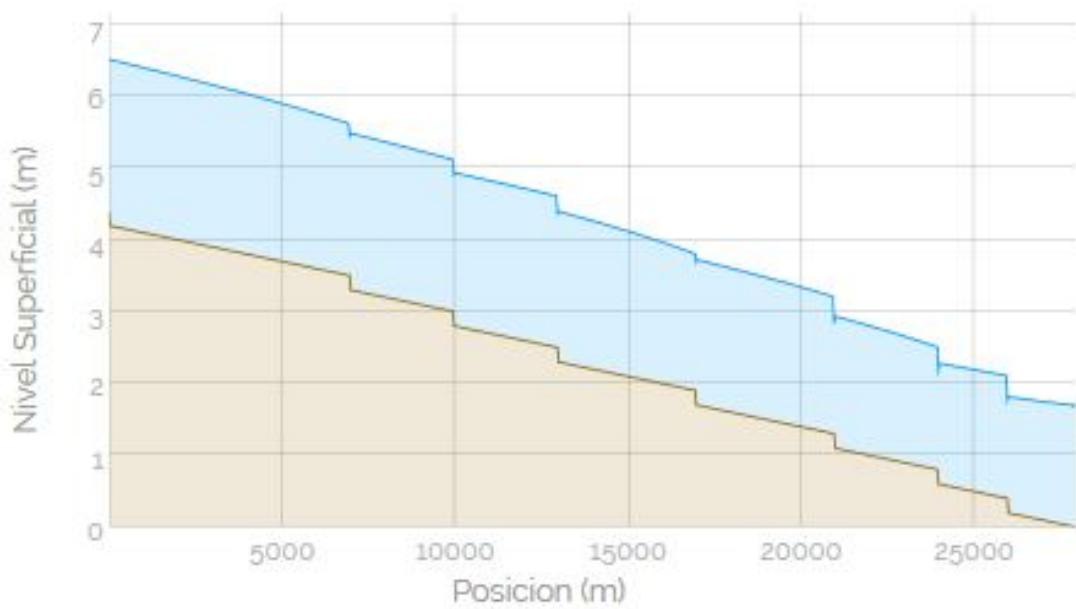


Figura 7.1.7.4 Perfil longitudinal del canal en $T=30.000$ s del Test 1 del caso 7

En la *Figura 7.1.7.5* se muestra el perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=30.000$ s. Al principio del canal tenemos $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$, a los 6.995 m tenemos la primera toma lateral que desaloja un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ con lo que el caudal del canal desciende hasta $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$, se mantiene constante hasta que alcanza la siguiente toma lateral situada a 9.995 m , ésta también extrae $1 \text{ m}^3/\text{s}$, con lo cual el caudal del canal desciende hasta $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Si seguimos el recorrido a lo largo de todo el canal se va extrayendo el mismo caudal por las tomas laterales, excepto en la toma lateral 5 que se extrae $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y la toma lateral 6 que se extrae $2 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta obtener un caudal de salida de $3 \text{ m}^3/\text{s}$.

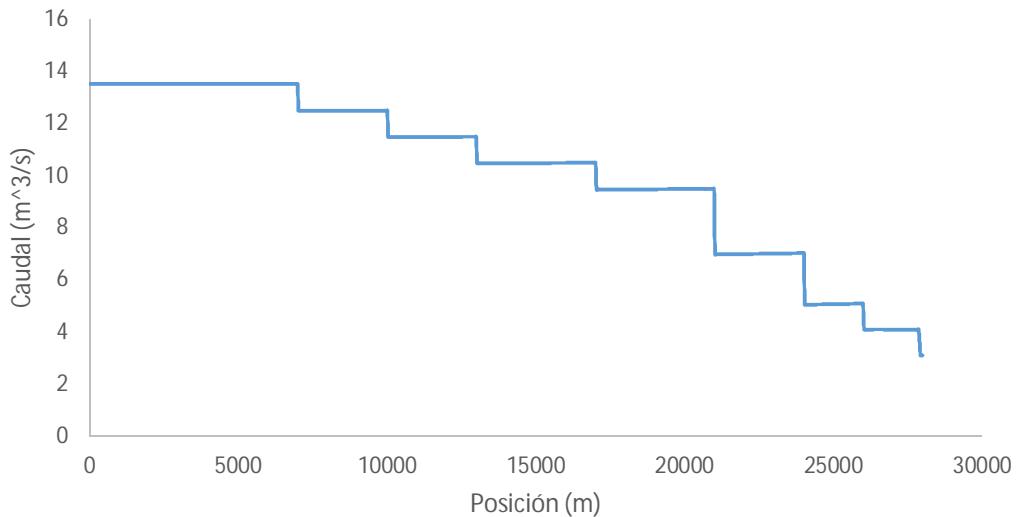


Figura 7.1.7.5 Perfil longitudinal de caudal en $T=30.000$ s del Test 1 del caso 7

En la *Figura 7.1.7.6* se muestra otro perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=70.000$ s. Ocurre lo mismo que lo descrito en la *Figura 7.1.7.5* pero con la diferencia de que las extracciones de caudal en las tomas laterales han sufrido variaciones y que el caudal de entrada es $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en lugar de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Las toma lateral 6 ahora está cerrada.

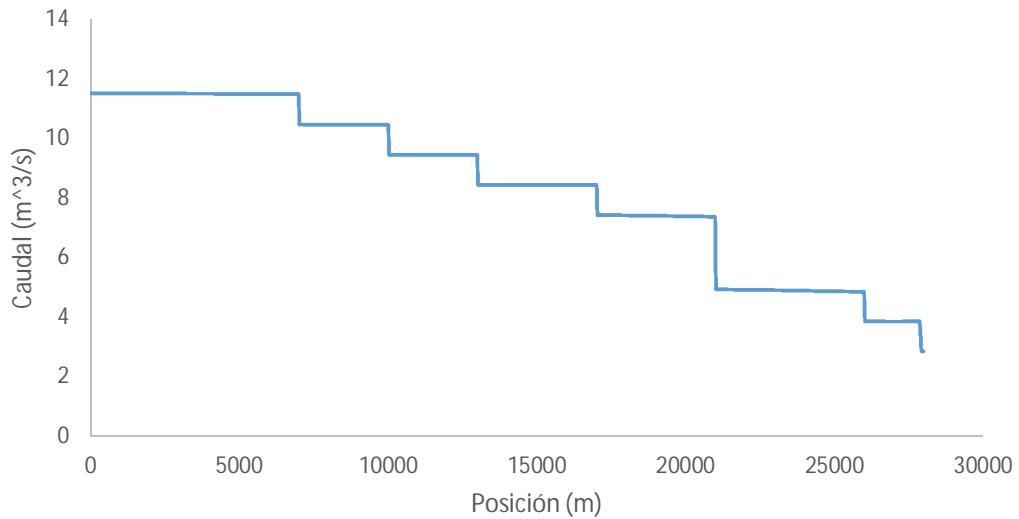


Figura 7.1.7.6 Perfil longitudinal de caudal en $T=70.000$ s del Test 1 del caso 7

Hemos comprobado como los caudales dentro del canal concuerdan con los resultados esperados, esto debe ser corroborado a la hora de examinar el funcionamiento de las compuertas transversales y de las tomas laterales. Para analizar ahora con detalle el comportamiento de las compuertas transversales se muestra una figura de cada compuerta por separado. Desde la *Figura 7.1.7.7* hasta la *Figura 7.1.7.13* se observan las aperturas de cada compuerta (azul), el nivel superficial del agua antes de cada compuerta (naranja) y la altura objetivo (gris). Si observamos las alturas objetivo y las alturas reales de todas las compuertas transversales vemos que son prácticamente iguales y constantes en el tiempo. Respecto a las aperturas de las compuertas todas tienen un punto en común, y es que no realizan muchas variaciones, es decir, las compuertas transversales se mantienen constantes en la posición correcta para conseguir su altura objetivo y modifican su posición cuando se modifican los caudales de extracción de las tomas laterales.

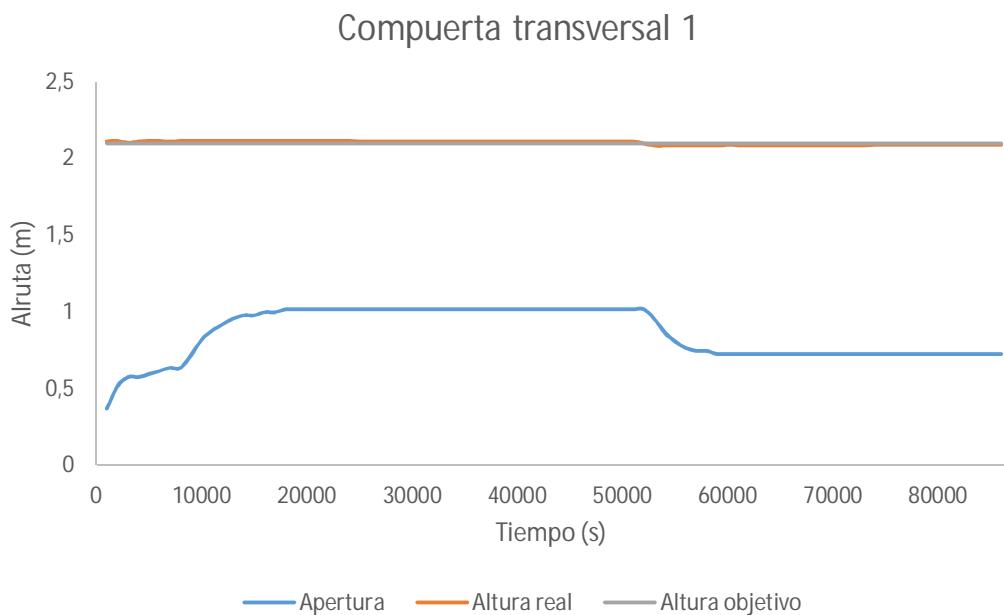


Figura 7.1.7.7 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 1 del caso 7

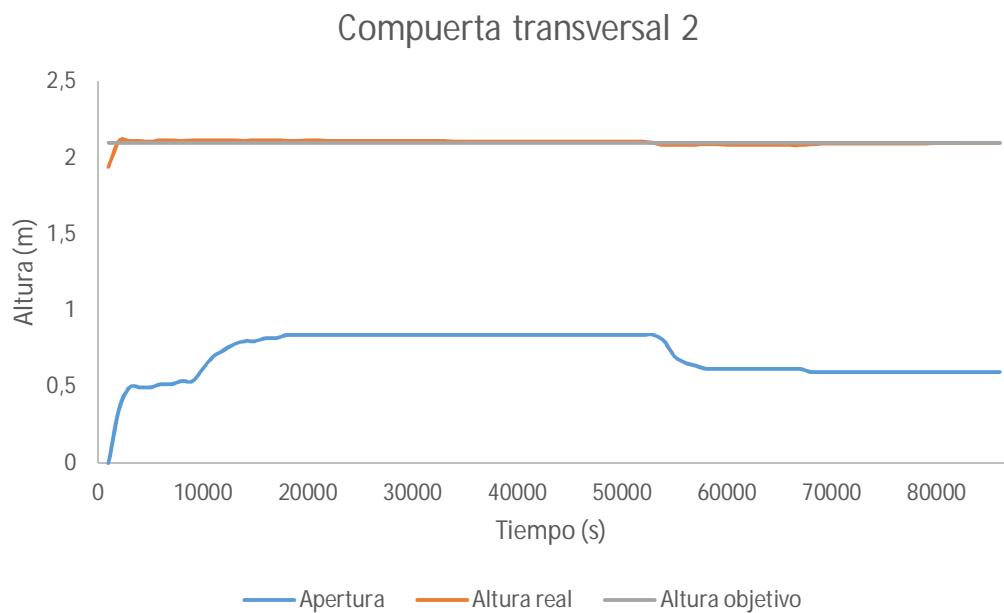


Figura 7.1.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 1 del caso 7

Compuerta transversal 3

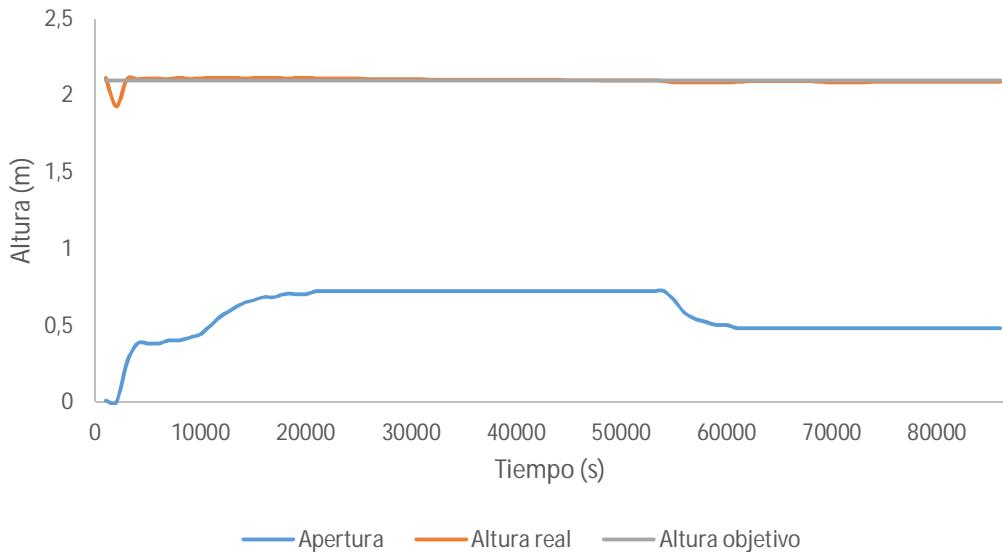


Figura 7.1.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 1 del caso 7

Compuerta transversal 4

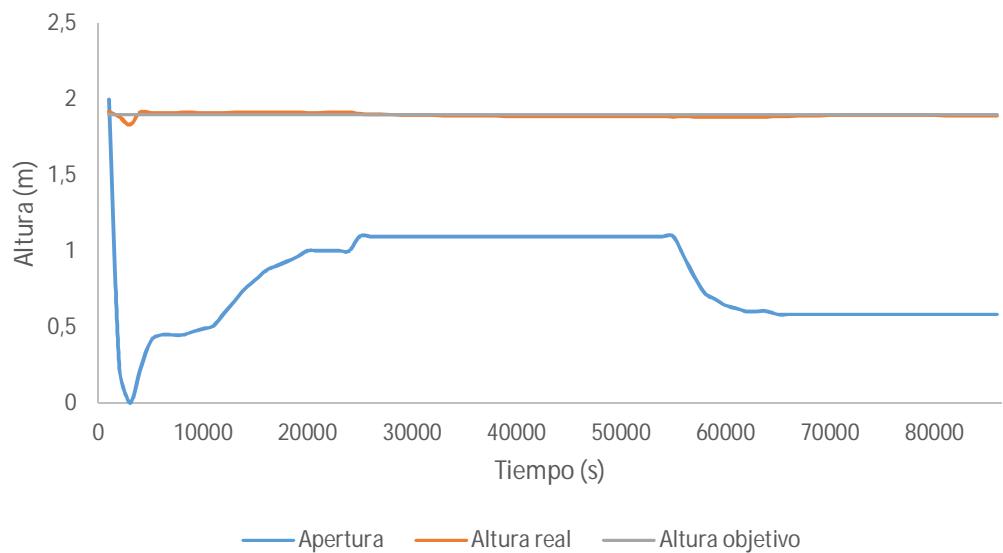


Figura 7.1.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 1 del caso 7

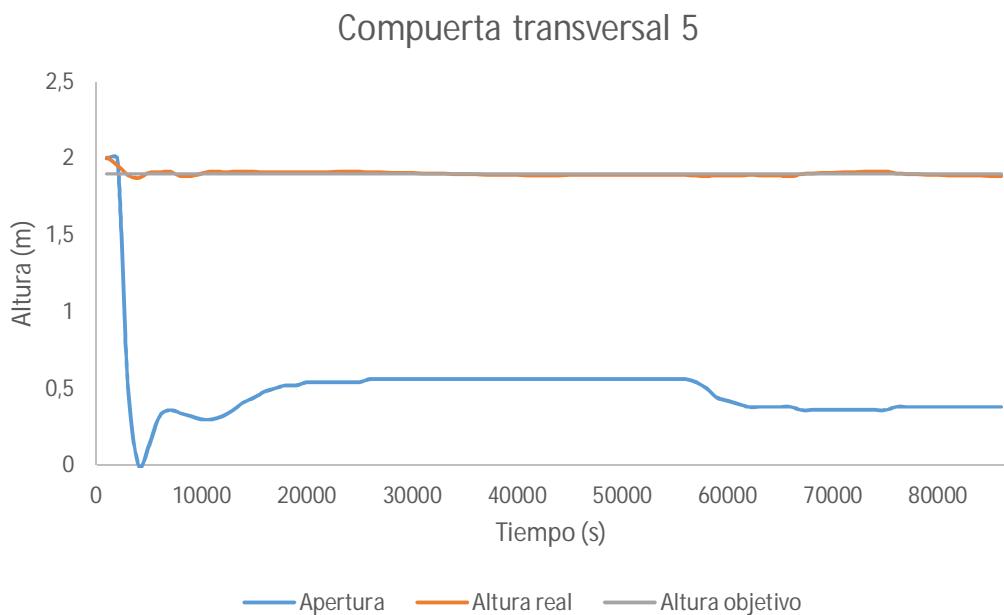


Figura 7.1.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 1 del caso 7

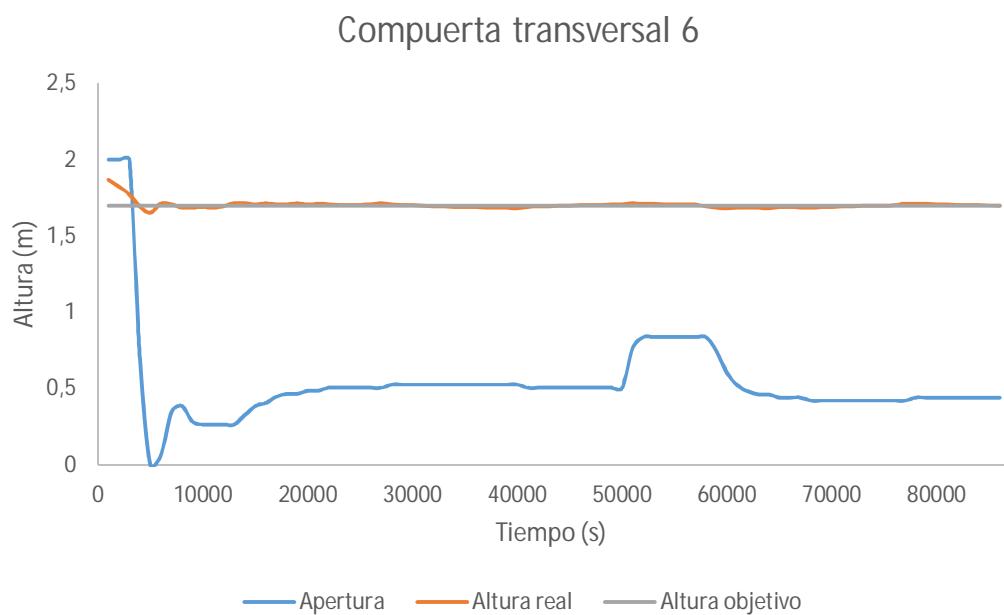


Figura 7.1.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 1 del caso 7

Compuerta transversal 7

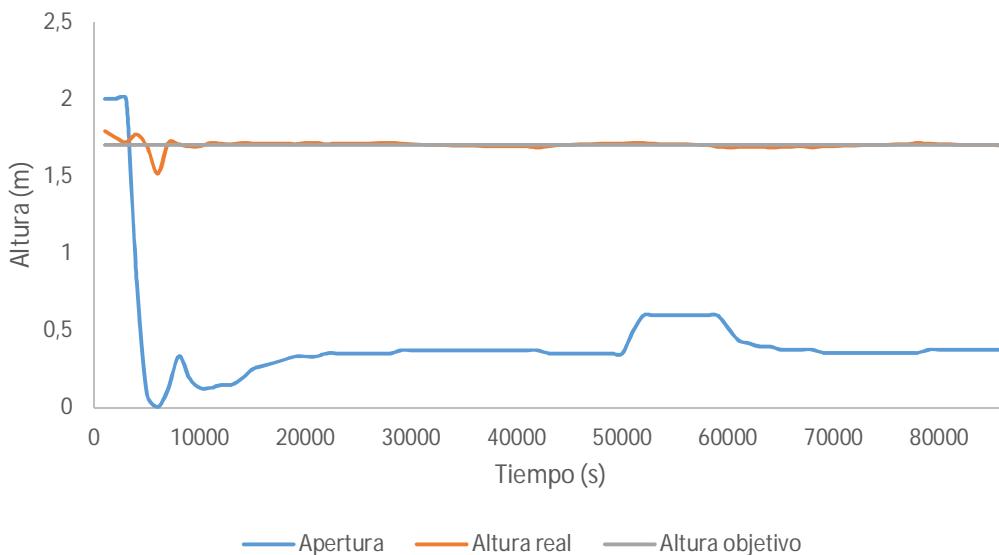


Figura 7.1.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 1 del caso 7

Por último, nos queda por ver el comportamiento de las tomas laterales. En la *Figura 7.1.7.14* se muestran las aperturas de todas las tomas laterales. Se observa como a las 2 h (7.200 s) del comienzo de la simulación se produce una variación en la apertura de las tomas 5 y 6. La toma lateral 5 (azul) aumenta su apertura hasta 0,75 m para extraer 2,5 m³/s y la toma lateral 6 (verde) duplica su apertura hasta 0,6 m para extraer 2 m³/s. Pasadas 14 h desde el inicio de la simulación (50.400 s) la toma lateral 6 se cierra totalmente. Las tomas laterales 1, 2, 3, 4, 7 y 8 mantienen una apertura constante durante toda la simulación de 0,3 m.

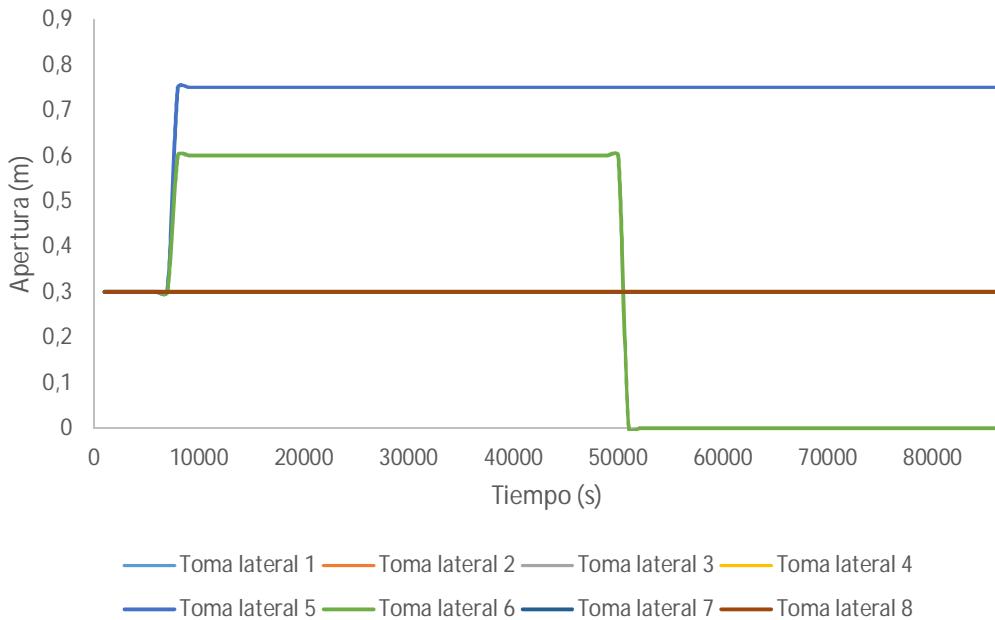


Figura 7.1.7.14 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 1 del caso 7

En la *Figura 7.1.7.15* se ve la evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales. Vemos como las tomas laterales 1, 2, 3, 4, 7 y 8 tienen una salida constante de caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ durante toda la simulación. Por otro lado las dos únicas tomas laterales que sufren variaciones en la extracción de caudal son las tomas laterales 5 y 6. La toma lateral 5 (azul) vemos como a las dos horas (7.200 s) duplica su caudal hasta pasadas 14 h desde el inicio de la simulación (50.400 s) donde al cerrar completamente esta toma lateral vemos que su caudal de extracción pasa a ser $0 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el final de la simulación. La toma lateral 6 (verde) aumenta su caudal de extracción a las dos horas hasta $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y ya se mantiene así constante hasta el final de la simulación. Si la comparamos con la *Figura 7.1.6* observamos que el caudal de extracción real de las tomas laterales es semejante al caudal deseado.

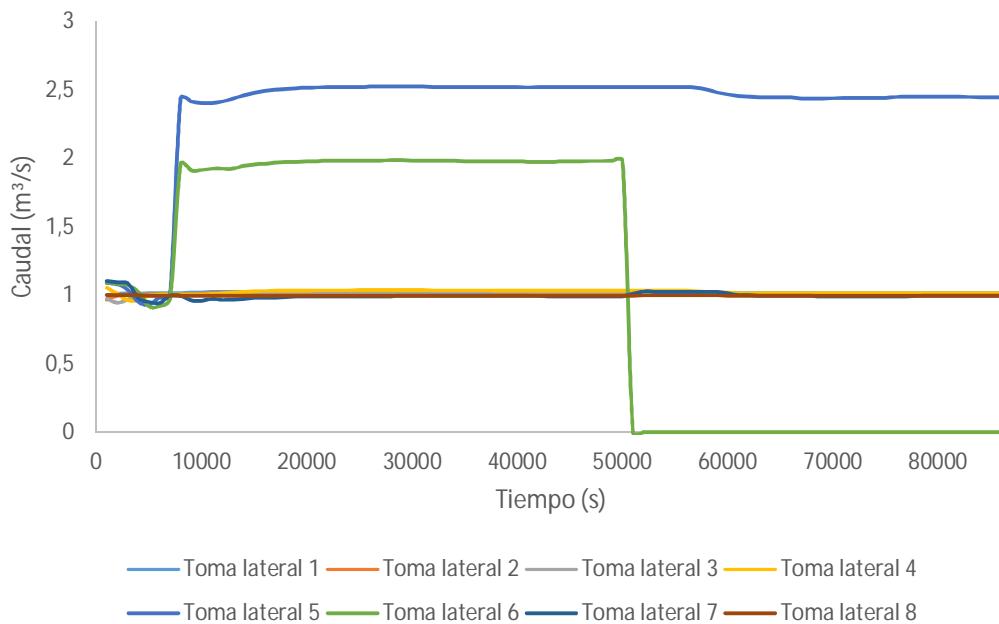


Figura 7.1.7.15 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales del Test 1 del caso 7

Todos estos resultados expuestos tienen coherencia. El objetivo final de este caso es conseguir que cada toma lateral tenga el caudal de extracción deseado en el instante deseado. Todo ello corrobora que el controlador PID de las compuertas transversales implementado en la herramienta de simulación Canalfowmodel cumple con los objetivos marcados en la regulación del canal propuesto.

7.2 TEST 2

Se puede recrear el test 2 introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: `caso7asce2test2`.

A continuación se presentan todos los datos del test 2.

7.2.1 Geometría

El canal a simular es exactamente el mismo que el que se ha presentado en el test 1 (ver *Tabla 7.1.1.1*, *Figura 7.1.1.1*, *Figura 7.1.1.2*, *Tabla 7.1.1.2*).

7.2.2 Condiciones Iniciales

Como condición inicial se parte de un estado estacionario con caudal constante de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Estado inicial	$Q_{\text{CONSTANTE}} = 2,7 \text{ m}^3/\text{s}$
<i>Tabla 7.2.2 Estado inicial del Test 2 del caso 7</i>	

7.2.3 Condiciones de Contorno

- Condiciones de entrada

El caudal de entrada impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 7.2.3* y responde a un hidrograma variable. Durante las dos primeras horas (7.200 s) tenemos un caudal de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$, pasadas estas dos primeras horas aumenta el caudal de entrada hasta $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y permanece constante durante 12 h, hasta las 14 h (50.400 s) desde el inicio de la simulación. Aquí vuelve a disminuir el caudal de entrada hasta $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y ya se mantiene constante este caudal hasta el final de la simulación.

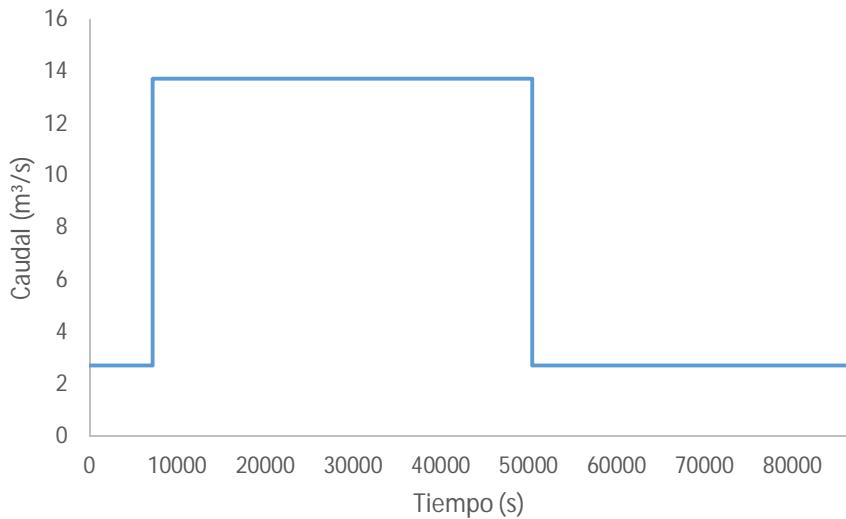


Figura 7.2.3 Hidrograma de entrada del Test 2 del caso 7

- Condiciones de salida

Como condición de contorno aguas abajo se impone una altura constante dada por ASCE de 1,7 m.

Condición de salida	$h(t)=1,7 \text{ m}$
Tabla 7.2.3 Condición de salida del Test 2 del caso 7	

7.2.4 Compuertas

El número y la posición en el canal de las compuertas transversales y de las tomas laterales es exactamente igual que en el test 1, es decir, tenemos 7 compuertas transversales cuyos datos se pueden ver en la *Tabla 7.1.4.1* y 8 tomas laterales.

La diferencia de este caso test con el anterior se encuentra en el caudal de extracción de las tomas laterales. Aquí las tomas laterales impares, es decir, las tomas laterales 1, 3, 5 y 7 han de extraer un caudal de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y las tomas laterales pares, es decir, las tomas laterales 2, 4, 6 y 8 han de extraer un caudal de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Al igual que en el test 1 hay que modelizar la geometría de las tomas laterales para conseguir el caudal de extracción deseado por cada una de ellas.

En la *Tabla 7.2.4.1* se muestran los datos de las tomas laterales en el test 2.

Número de compuerta	1
Posición (m)	6.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,27
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	2
Posición (m)	9.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,42
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	3
Posición (m)	12.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,29
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	4
Posición (m)	16.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,49
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	5
Posición (m)	20.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,36
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	6
Posición (m)	23.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,61
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	7
Posición (m)	25.995
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,45
Apertura (m)	0,1

Número de compuerta	8
Posición (m)	27.900
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,7
Apertura (m)	0,1

Tabla 7.2.4.1 Datos de las tomas laterales del Test 2 del caso 7

7.2.5 Especificaciones para el control

Los parámetros usados en la simulación y obtenidos como óptimos en este caso realizando varias simulaciones se muestran en la *Tabla 7.2.5*.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 7.2.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 2 del caso 7

7.2.6 Extracciones de caudal en las tomas laterales

En este test 2 se introducen más variaciones en la extracción de caudal que en el test 1 para observar si el regulador PID funciona correctamente regulando las compuertas transversales. Las variaciones experimentadas a lo largo de la simulación se muestran en la *Tabla 7.2.6* y en la *Figura 7.2.6*.

Número de toma lateral	Caudal de extracción inicial tomas laterales (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 2 h del inicio de la simulación (m ³ /s)	Caudal de extracción en las tomas laterales pasadas 14 h del inicio de la simulación (m ³ /s)
1	0,2	1,7	0,2
2	0,3	1,8	0,3
3	0,2	2,7	0,2
4	0,3	0,3	0,3
5	0,2	0,2	0,2
6	0,3	0,8	0,3
7	0,2	1,2	0,2
8	0,3	2,3	0,3

Tabla 7.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso 7

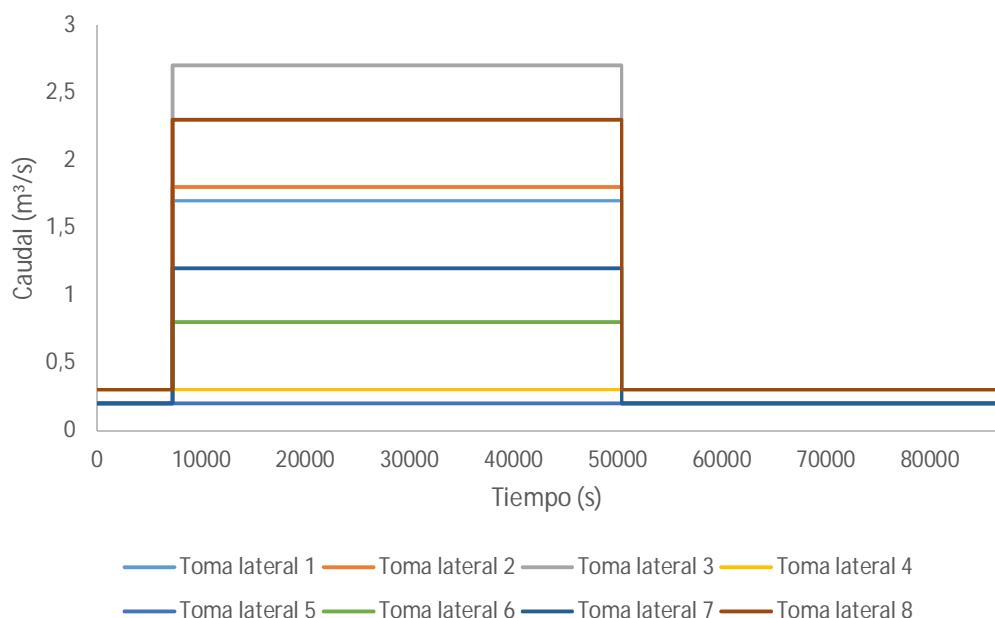


Figura 7.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso

7.2.7 Resultado de la simulación

En la *Figura 7.2.7.1* se muestra la evolución temporal del error de masa, que al igual que en el test 1 se observa que es 0 durante toda la simulación.

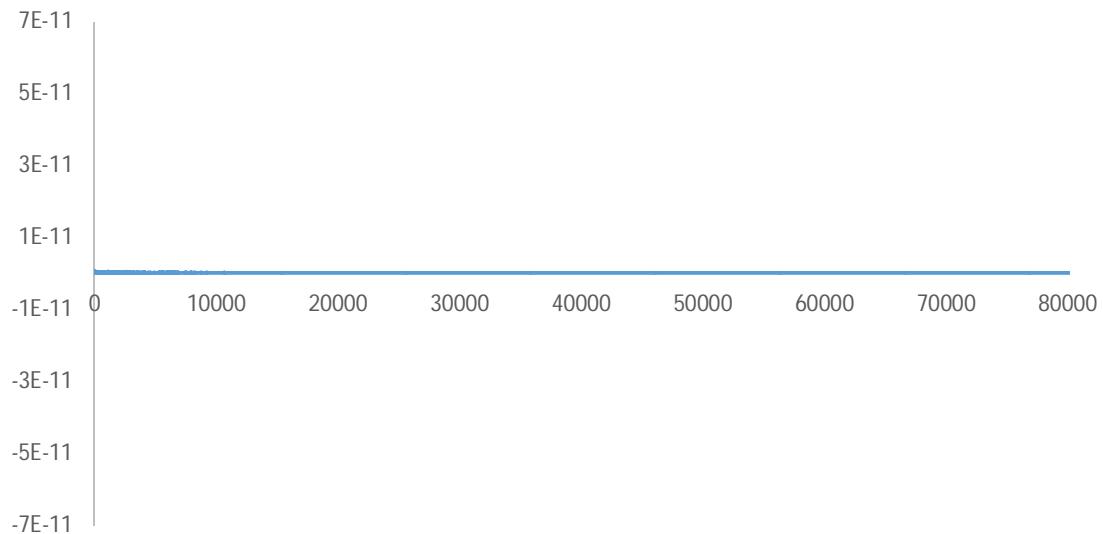


Figura 7.2.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 2 del caso 7

En la *Figura 7.2.7.2* se muestra la evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja). El caudal de entrada se ajusta al hidrograma de entrada de la *Figura 7.2.3*. Respecto al caudal de salida, vemos que hasta pasadas aproximadamente 10 h del comienzo de la simulación (35.000 s) es negativo. Este dato numérico simplemente nos indica que a la salida del canal no se consigue la altura objetivo que tenemos fijada como condición de salida (1,7 m) y que para conseguirla la bomba debe añadir caudal al último tramo del canal. Esto es debido a que el canal parte con una condición inicial de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$, y es poco caudal para conseguir esta altura. Por otro lado a las 2 h del comienzo de la simulación el hidrograma de entrada cambia y aumenta su caudal hasta $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$, este caudal ya permite obtener la altura objetivo deseada en el último tramo, pero debido a que el canal es tan largo (28.000 m), le cuesta mucho tiempo al caudal recorrer todo el canal hasta llegar al final (aproximadamente 28.000 s). Una vez pasadas las 10 h desde el inicio de la simulación el canal alcanza un estado estacionario, donde su caudal de salida es aproximadamente $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Si hacemos balance entre el caudal de entrada ($13,7 \text{ m}^3/\text{s}$) y el caudal total que se extrae por todas las tomas laterales ($11 \text{ m}^3/\text{s}$), vemos que el caudal de salida efectivamente ha de ser $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Cuatro horas más tarde (50.400 s desde el inicio de la simulación), el caudal de entrada retoma su valor inicial que ya se mantendrá constante hasta el final de la simulación. Por contra el caudal de salida aumenta ya que las tomas laterales también han disminuido su extracción de caudal. Sobre 60.000 s

(aproximadamente 17 h) el caudal de salida cambia su tendencia debido ya que nuevamente no hay caudal suficiente para alcanzar la altura objetivo del último tramo. En esta última parte de la simulación el canal no llega a alcanzar nuevamente el estacionario, con lo cual el caudal de salida no es constante.



Figura 7.2.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 2 del caso 7

En la *Figura 7.2.7.3* se muestra un perfil longitudinal del canal en $T=0$ s. Podemos ver la condición inicial introducida (*Tabla 7.2.2*). Todo el canal tiene un caudal de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

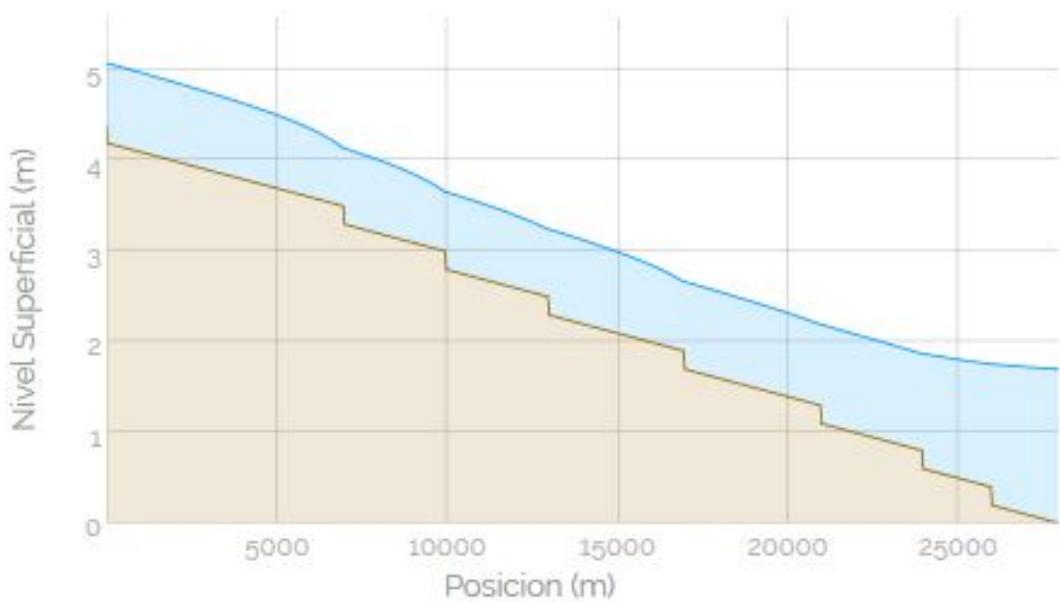


Figura 7.2.7.3 Perfil longitudinal del canal en $T=0$ s del Test 2 del caso 7

En la Figura 7.2.7.4, Figura 7.2.7.5, Figura 7.2.7.6 se muestra la evolución temporal que sufre el canal. A partir de 7.200 s el caudal de entrada es de $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal comienza a recorrer todo el canal. Vemos como cada tramo se va llenando de agua hasta que alcanza la altura objetivo de la compuerta transversal, entonces ésta comienza a abrirse y permite el paso de caudal hacia el siguiente tramo, así sucesivamente hasta que el canal alcanza el estacionario.

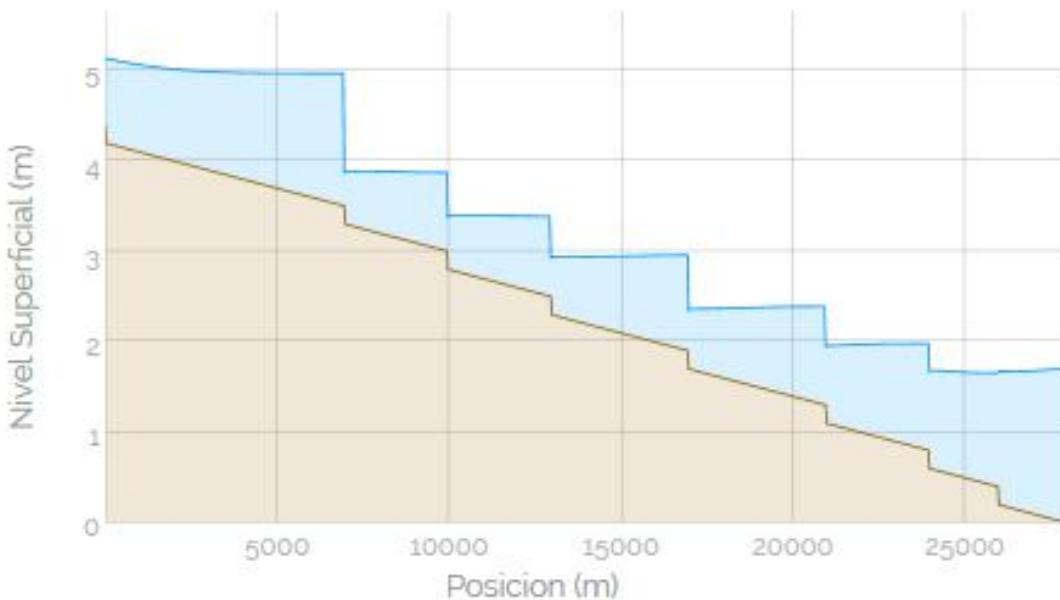


Figura 7.2.7.4 Perfil longitudinal del canal en $T=7.000$ s del Test 2 del caso 7

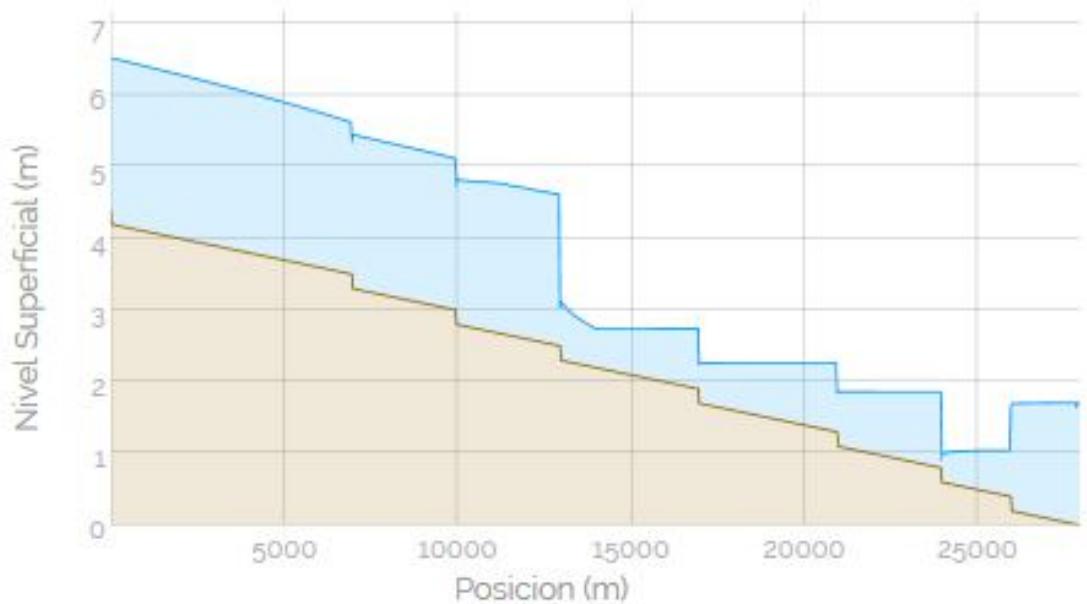


Figura 7.2.7.5 Perfil longitudinal del canal en $T=20.000$ s del Test 2 del caso 7

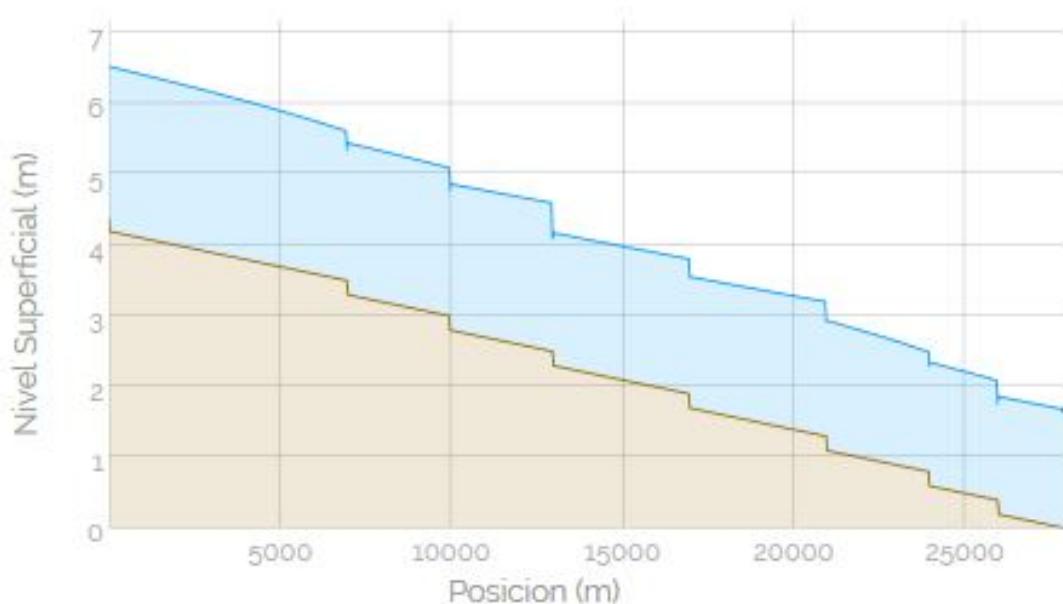


Figura 7.2.7.6 Perfil longitudinal del canal en $T=40.000$ s del Test 2 del caso 7

Por último, en la *Figura 7.2.7.7* se muestra el perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=40.000$ s donde el canal ha alcanzado el estacionario. Tenemos un caudal de entrada de $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$, la toma lateral 1 situada a 6.995 m extrae $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$, la toma lateral 2 situada a 9.995 m extrae $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, la toma lateral 3 situada a 12.995 m extrae $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y así

sucesivamente. Todas las tomas laterales extraen su respectivo caudal hasta observar que tenemos un caudal de salida de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

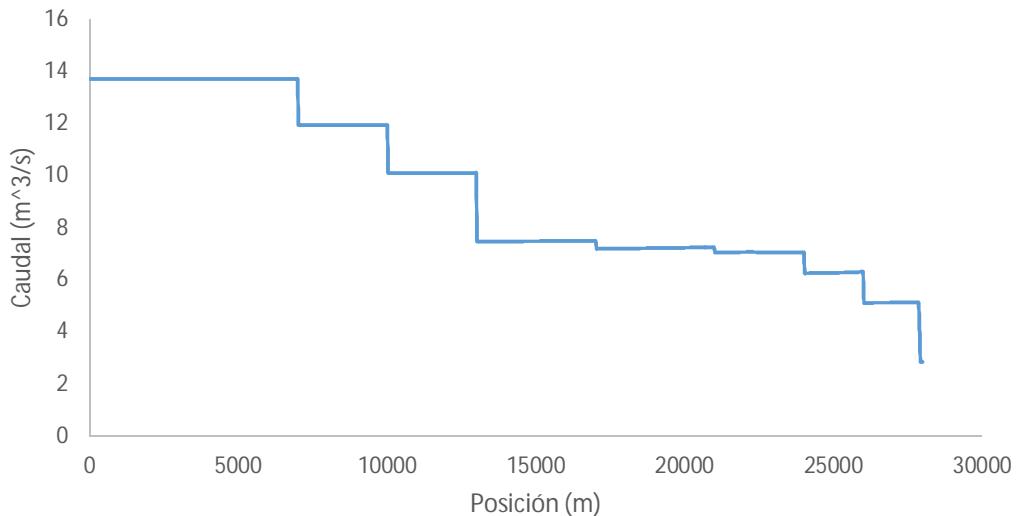


Figura 7.2.7.7 Perfil longitudinal de caudal en $T=40.000 \text{ s}$ del Test 2 del caso 7

Hemos comprobado también en este test como los caudales dentro del canal concuerdan con los resultados esperados, esto debe ser corroborado a la hora de examinar el funcionamiento de las compuertas transversales y de las tomas laterales. Para examinar las compuertas transversales se muestra cada compuerta por separado para poder observar con más claridad los resultados. Desde la *Figura 7.2.7.8* hasta la *Figura 7.2.7.14* se observan las aperturas de cada compuerta (azul), el nivel superficial del agua antes de cada compuerta (naranja) y la altura objetivo (gris). Si observamos las aperturas de las compuertas transversales vemos que al comienzo de la simulación todas parten como cerradas, esto es debido a que ninguna de ellas consigue alcanzar su altura objetivo con el caudal que hay en el canal. Conforme va pasando el tiempo, y especialmente pasadas 2 h desde el inicio de la simulación (7.200 s) cuando aumenta el caudal de entrada, el primer tramo consigue alcanzar su altura objetivo y la compuerta comienza a abrirse permitiendo el paso de caudal hacia el segundo tramo. Lo mismo ocurre con la segunda compuerta pero con un retraso en el tiempo respecto a la compuerta transversal 1, conforme se llena el tramo 2 comienza a abrirse la compuerta transversal 2 dejando pasar el caudal hacia el tramo 3. Sucesivamente se va llenando todo el canal alcanzando las alturas objetivo de cada compuerta transversal hasta que sobre 35.000 s el canal alcanza el estacionario. Éste dura hasta que a las 14 h desde el inicio de la simulación (50.400 s) disminuye el caudal de entrada y el caudal de extracción de las tomas laterales, volviendo a sus valores iniciales. Por lo tanto las compuertas transversales aumentan sus aperturas para seguir manteniendo sus alturas objetivo, ya que las tomas laterales extraen menos caudal que anteriormente. Una vez pasada esta transición las compuertas transversales tienen unas aperturas entre 0 y 0,4 m para alcanzar sus alturas objetivo hasta el final de la simulación.

Compuerta transversal 1

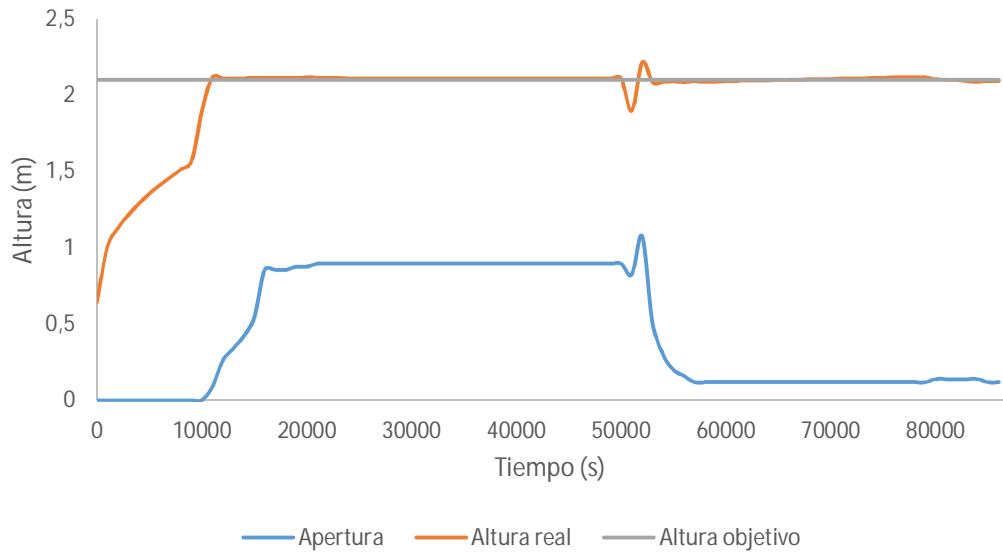


Figura 7.2.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 2 del caso 7

Compuerta transversal 2

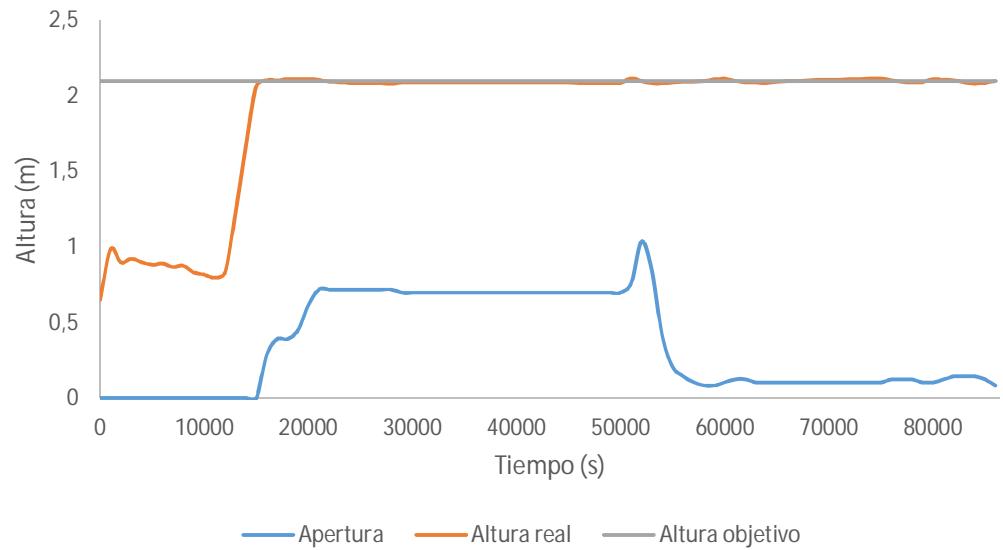


Figura 7.2.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 2 del caso 7

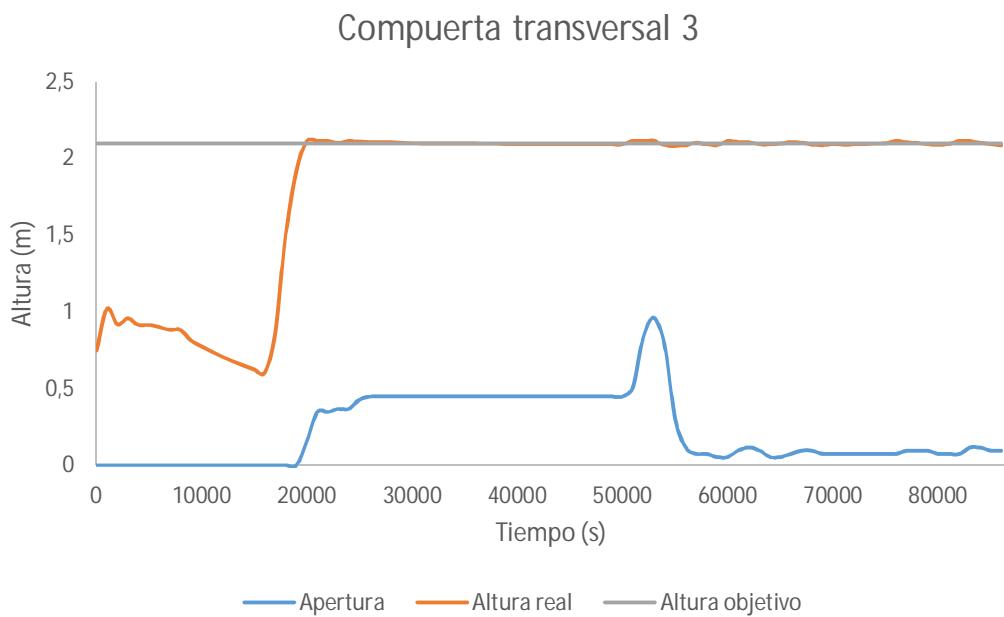


Figura 7.2.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 2 del caso 7

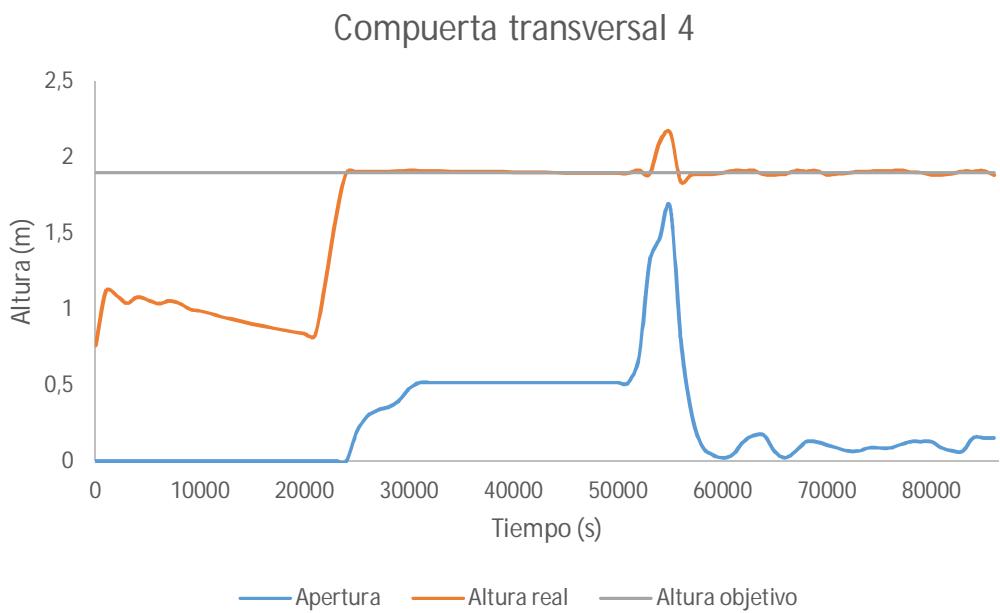


Figura 7.2.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 2 del caso 7

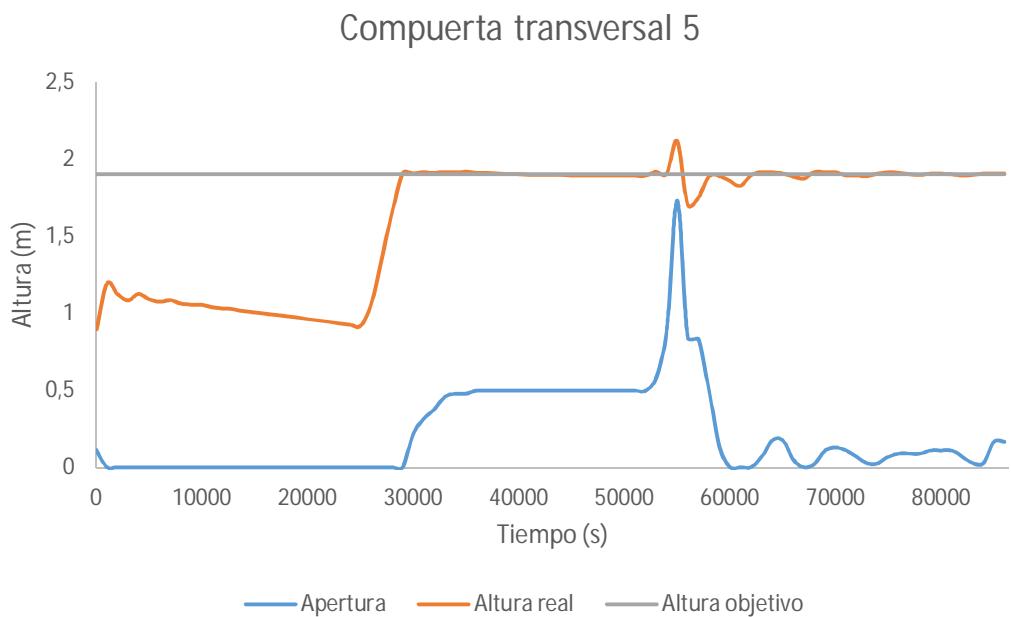


Figura 7.2.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 2 del caso 7

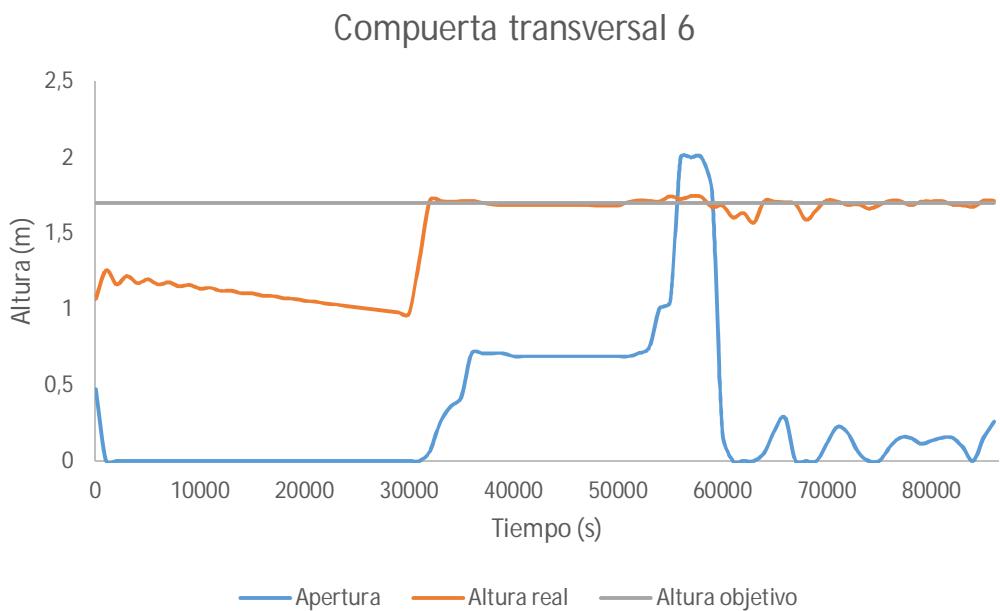


Figura 7.2.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 2 del caso 7

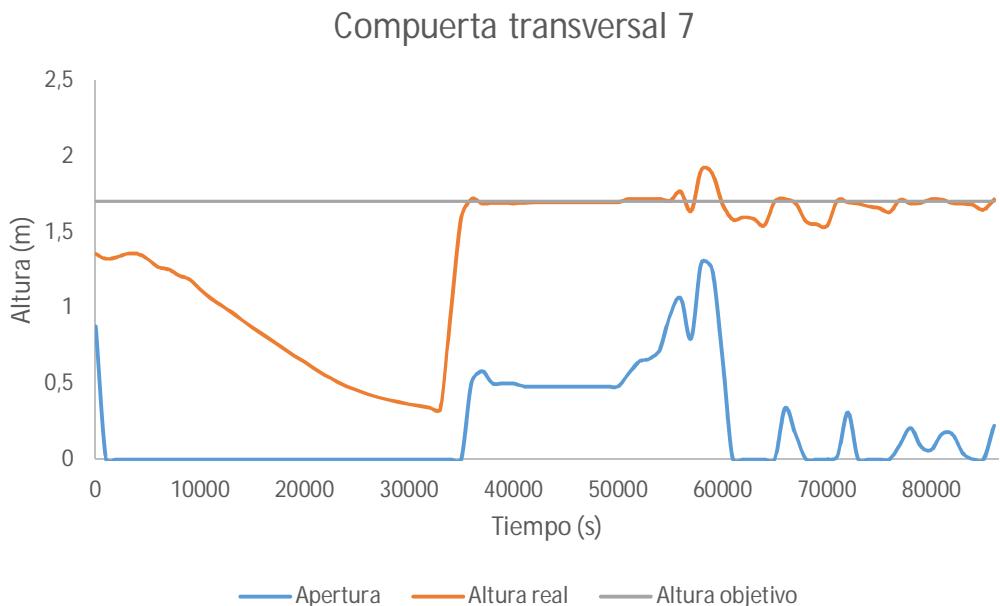


Figura 7.2.7.14 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 2 del caso 7

Por último queda por analizar el comportamiento de las tomas laterales. En la Figura 7.2.7.15 se pueden ver las aperturas de todas las tomas laterales. De partida, todas las tomas laterales tienen una apertura de 0,1 m hasta que pasadas 2 h (7.200 s) desde el comienzo de la simulación se produce una variación en la apertura de varias tomas laterales. Todas las tomas laterales excepto las tomas laterales 4 y 5 aumentan su apertura para aumentar la extracción de caudal. Éstas permanecen constantes hasta que nuevamente pasadas 14 h (50.400 s) desde el inicio de la simulación vuelven a recuperar los valores de extracción de caudal iniciales.

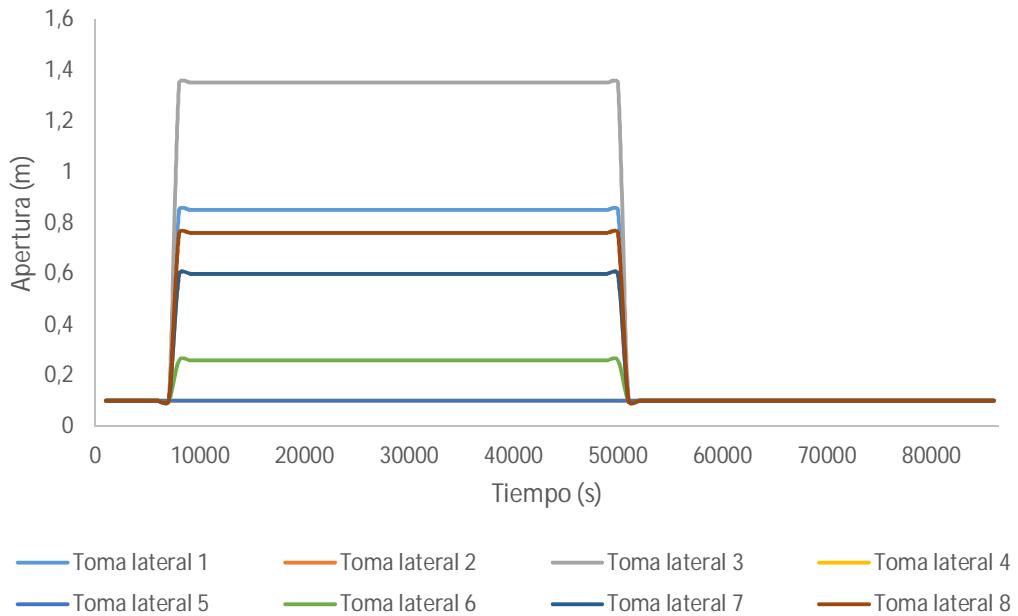


Figura 7.2.7.15 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 2 del caso 7

Al igual que en el test 1 se representan los caudales de extracción de las tomas laterales en dos Figuras. En la *Figura 7.2.7.16* se ven las 4 primeras tomas laterales y en la *Figura 7.2.7.17* se ven las 4 últimas tomas laterales. En la *Figura 7.2.7.16* podemos ver como inicialmente las tomas laterales pares (2 y 4) extraen $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y las tomas laterales impares (1 y 3) extraen $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. La toma lateral 4 (amarillo) mantiene constante una extracción de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ durante toda la simulación. Pasadas 2h desde el inicio de la simulación aumenta la extracción de caudal de todas las tomas laterales, debido al problema mencionado anteriormente de que no tenemos suficiente caudal en el canal para extraerlo por las tomas laterales, tenemos un periodo de transición hasta aproximadamente 25.000 s (7 h) donde las tomas laterales no pueden extraer el caudal necesario. Se observa que conforme avanza el caudal de entrada por el canal las tomas laterales éstas van consiguiendo su caudal de extracción necesario. En primer lugar la toma lateral 1 (azul) sobre los 12.000 s alcanza su extracción de caudal deseado. Posteriormente sobre 16.000 s es la toma lateral 2 (naranja) la que alcanza su extracción de caudal deseado. Por último la toma lateral 3 (gris) sobre los 24.000 s alcanza también su caudal de extracción deseado. A partir de este punto hasta los 50.400 s (14 h) desde el inicio de la simulación la extracción de caudal se mantiene constante hasta que nuevamente se modifica la extracción de caudal de todas las tomas laterales recuperando sus valores iniciales. Desde este punto hasta el final de la simulación todas las tomas laterales mantienen constante su extracción de caudal.

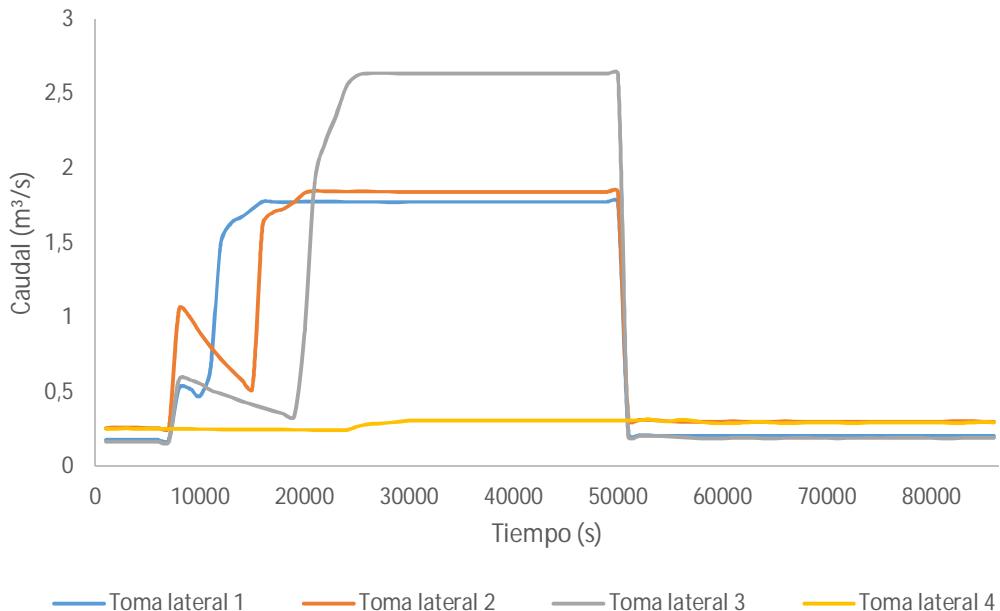


Figura 7.2.7.16 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 1, 2, 3 y 4 del Test 2 del caso 7

En la *Figura 7.2.7.17* podemos ver como la toma lateral 5 (azul) extrae un caudal constante durante toda la simulación de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. En la toma lateral 6 (naranja) ocurre lo mismo que lo mencionado en las tomas laterales 1, 2 y 3, es decir, tiene un periodo de transición hasta que le llega el caudal suficiente para extraerlo por la toma lateral sobre los 35.000 s . En las tomas laterales 7 (gris) y 8 (amarillo) no ocurre este fenómeno y esto es debido a la condición de salida de una altura constante de $1,7 \text{ m}$. Esto permite tener caudal suficiente para extraerlo por las tomas laterales. Pasadas las 14 h de simulación las tomas laterales recuperan sus valores iniciales de extracción de caudal, manteniéndose constante hasta el final de la misma. Si comparamos los caudales de extracción reales obtenidos con los deseados (ver *Figura 7.2.6*) vemos que cuando el canal ha alcanzado el estacionario hasta el final de la simulación los resultados son semejantes.

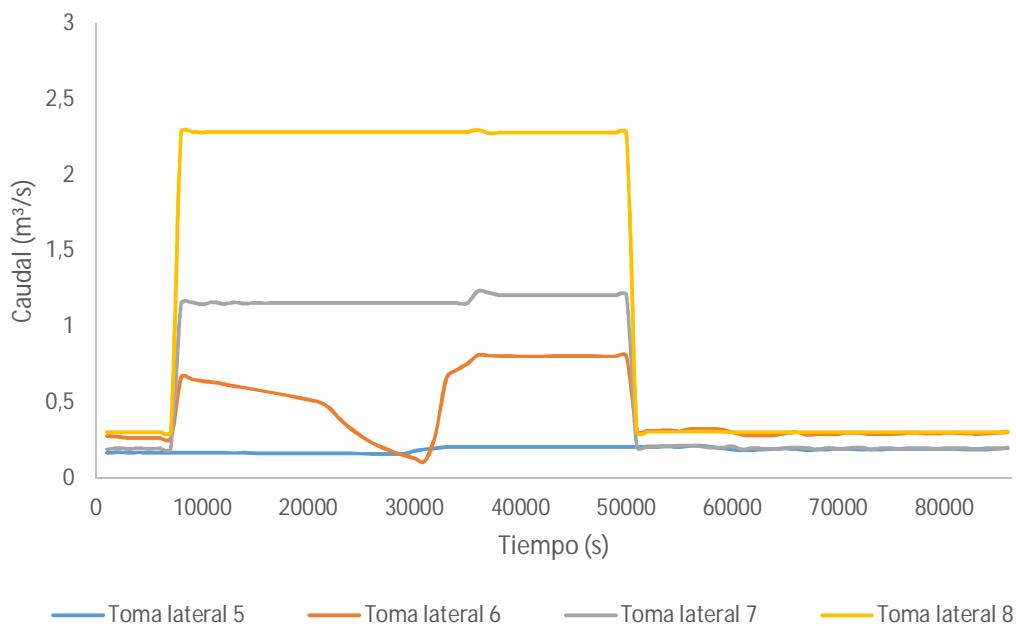


Figura 7.2.7.17 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 5, 6, 7 y 8 del Test 2 del caso 7

En este test 2 se viene a ratificar lo ya conseguido en el test 1. Hemos partido de la misma geometría que en el test 1 pero se ha aumentado la cantidad de variaciones en las extracciones de caudal de las tomas laterales. Ante el aumento de la complejidad en el caso hemos visto que el regulador PID actúa correctamente para adecuarse a todos los cambios sufridos, consiguiendo que todas las compuertas transversales alcancen sus alturas objetivo y por tanto, que todas las tomas laterales extraigan el caudal deseado.

Una vez simulados los dos canales expuestos por ASCE, es evidente que el regulador PID y más en concreto la herramienta Canalfowmodel es apta y fiable para su uso en canales reales.

APLICACIÓN A UN CASO REAL

Después de haber calibrado, validado y ajustado los parámetros de simulación y regulación con los tests académicos y los tests de referencia, se procede a realizar una simulación de un canal real: el canal de riego de Pina de Ebro, pudiendo comparar los datos obtenidos con datos reales tomados del propio canal.

8 CASO 8: CANAL DE RIEGO DE PINA DE EBRO

El canal de riego de Pina de Ebro se localiza en la localidad de Pina de Ebro próxima a Zaragoza. El canal se nutre del río Ebro que transcurre cercano a esta localidad. El canal sirve para suministrar mediante sus tomas laterales un caudal a las acequias adyacentes, y éstas a su vez aportar un caudal de agua a los terrenos colindantes para así poder ser regados. Consta de aproximadamente 12 km de longitud, sección recta y pendiente variable. Como elementos de regulación del caudal el canal cuenta con 4 compuertas transversales y 19 tomas laterales. El agua sobrante en el canal retorna al río Ebro. En las *Figuras 8.0.1 y 8.02* se ve una panorámica general del canal, con la superficie regada, y la localización orientativa de las tomas laterales y de las compuertas transversales. A su vez en la *Figura 8.0.3* se ve un esquema del canal donde se puede ver la localización de sus compuertas transversales y tomas laterales. Se ha realizado la simulación correspondiente a 5 días; desde el 20 de enero de 2013 a las 00:00 h hasta el 25 de enero de 2013 a las 13:00 h. Con lo cual la simulación tendrá una duración total de 133 h (478.800 s).

Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: *caso8pinadeebro*.

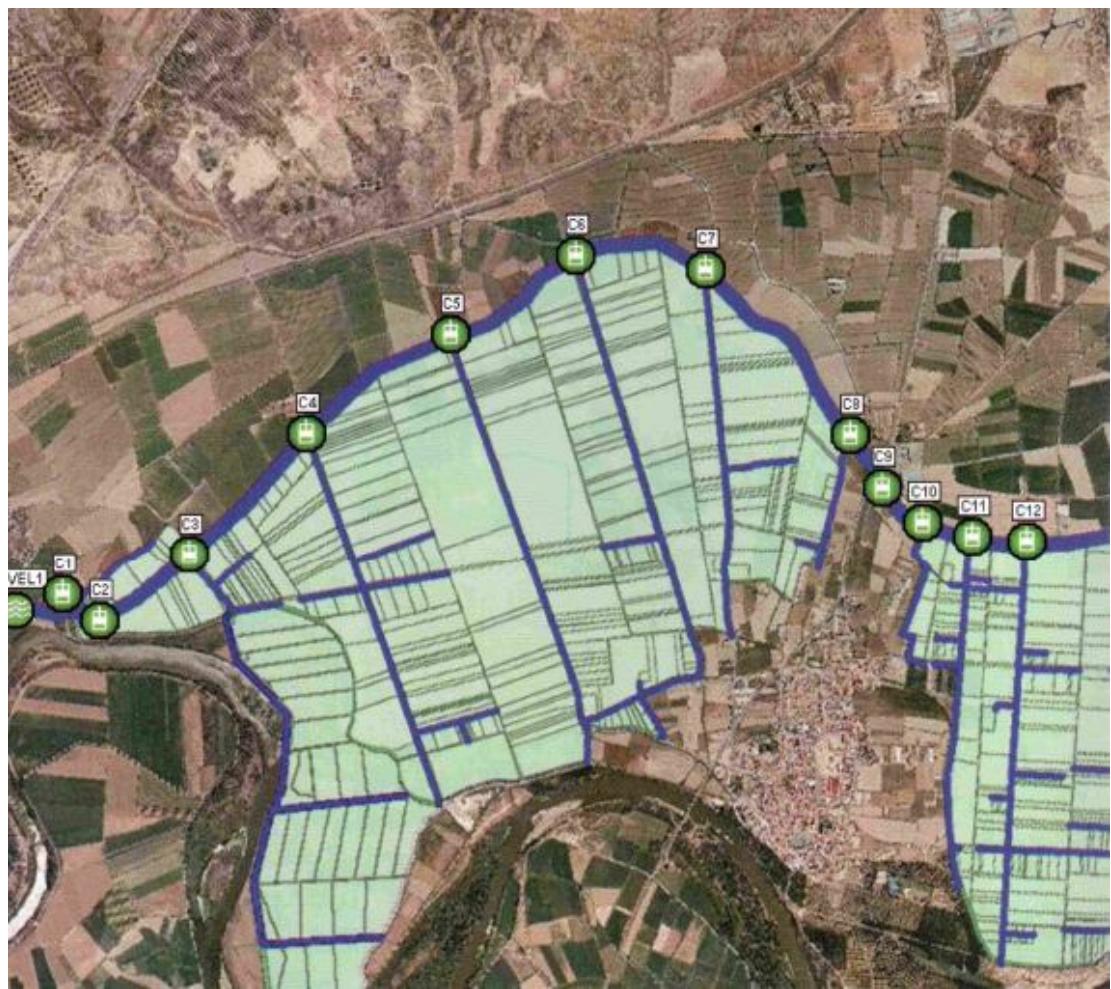


Figura 7.2.7 Vista en planta del primer tramo del canal de riego de Pina de Ebro

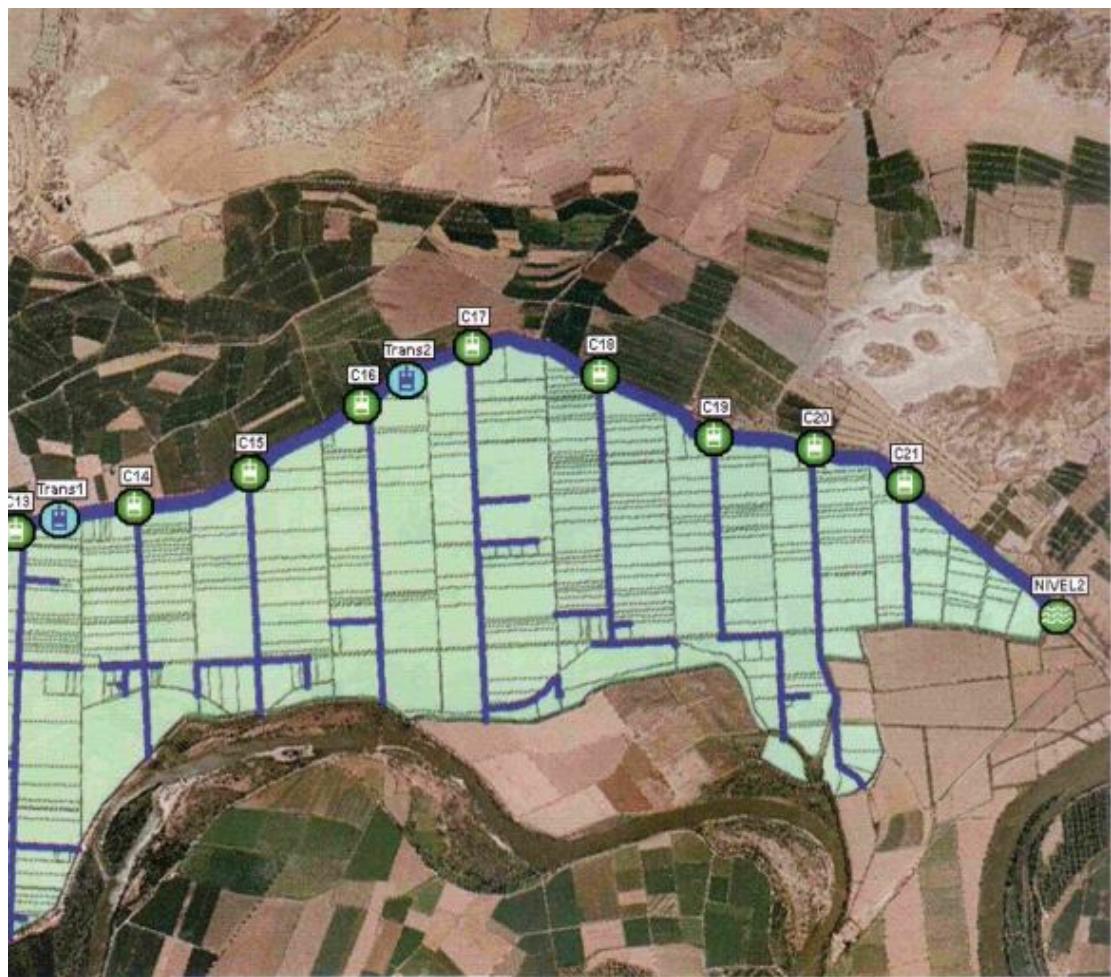


Figura 7.2 Vista en planta del segundo tramo del canal de riego de Pina de Ebro

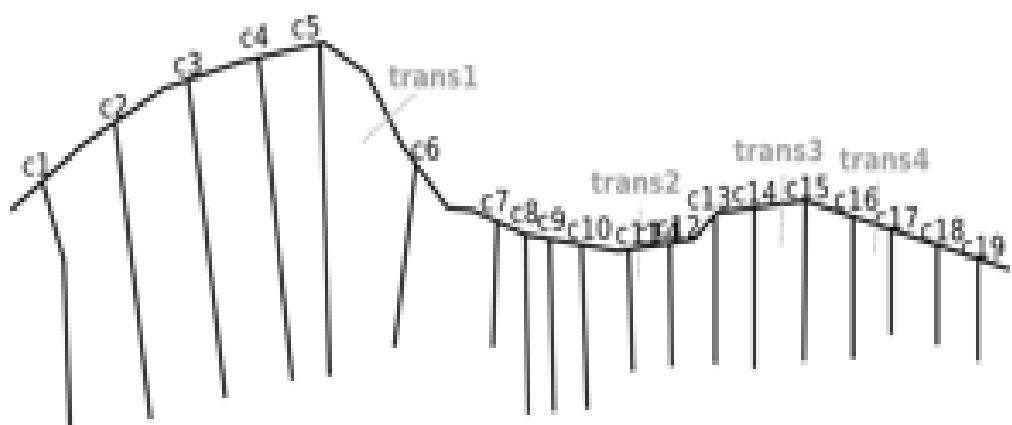


Figura 7.2 Esquema en planta del canal de riego de Pina de Ebro con la localización de sus compuertas transversales y tomas laterales

8.1 GEOMETRÍA

El canal de Pina de Ebro tiene una longitud de 11.791 m. Su sección transversal es rectangular. Tiene dos pendientes diferentes, una pendiente constante de 0,0002 m/m desde el inicio del canal hasta 10.240 m, y otra pendiente constante de 0,007 m/m desde 10.240 m hasta el final del canal. El canal es de cemento pulido, con lo cual tenemos un coeficiente de rozamiento de Manning de 0,011 s/m^{1/3} [Chow 1959] (ver *Tabla 8.1*).

Longitud (m)	11.791
Coeficiente de Manning (s/m^{1/3})	0,011
Ángulo de inclinación de 0 a 10.240 m (m/m)	0,0002
Ángulo de inclinación de 10.240 m hasta el final (m/m)	0,007

Tabla 8.1 Datos geométricos del caso 8

El perfil longitudinal del canal se puede observar en la *Figura 8.1.1*, donde se ve la longitud total del canal, la longitud de cada tramo, y la pendiente del canal, gráficamente se aprecia que el canal tiene dos pendientes diferenciadas mencionadas anteriormente. También se muestra de manera orientativa la disposición de las compuertas transversales y de las tomas laterales. Se parte de una altura inicial de 3,42 m.

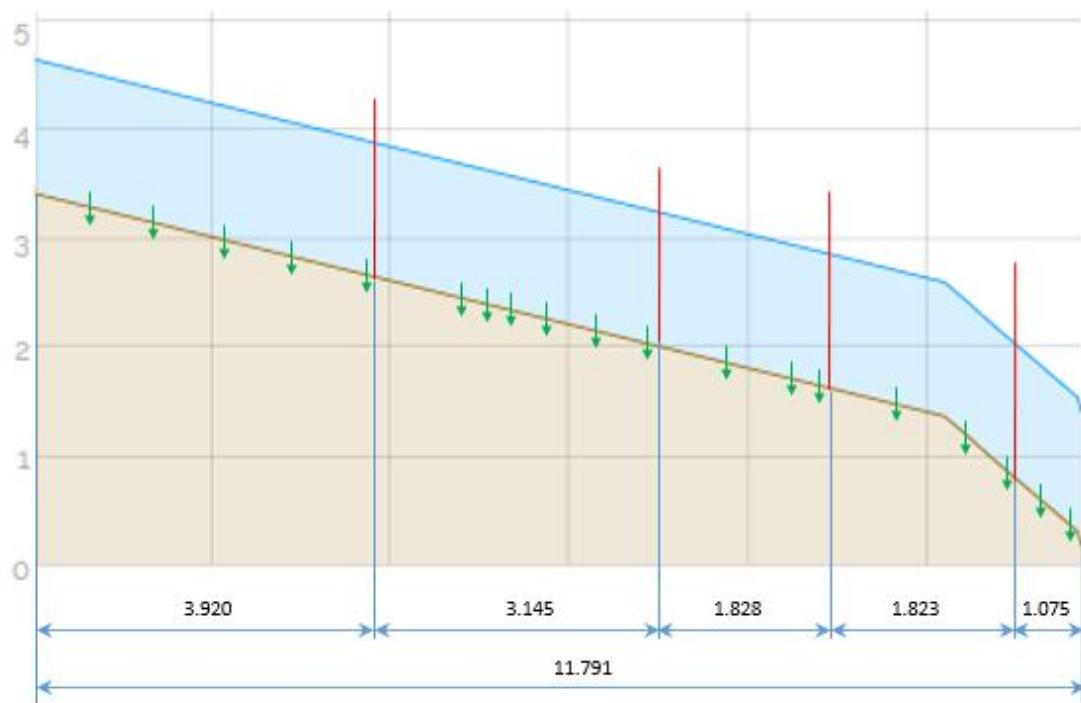


Figura 8.1.1 Perfil longitudinal en m del canal del caso 8. Localización orientativa de las compuertas transversales (rojo) y tomas laterales (verde)

La geometría de la sección transversal del canal queda definida en la *Figura 8.1.2*.

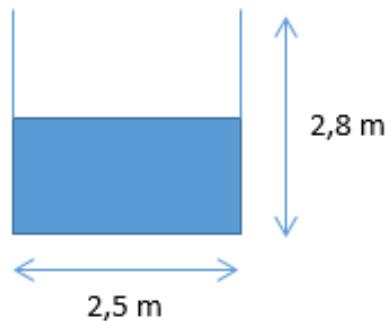


Figura 8.1.2 Sección transversal del canal del caso 8

8.2 CONDICIONES INICIALES

Como condición inicial se parte de una altura constante en todo el canal de 1,23 m. Se parte de esta condición inicial ya que el canal se encuentra en estacionario y con esta altura constante al comienzo de la simulación.

Estado inicial	$h(t)=1,23 \text{ m}$
----------------	-----------------------

Tabla 8.2 Estado inicial del caso 8

8.3 CONDICIONES DE CONTORNO

• Condiciones de entrada

El caudal impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la *Figura 8.3* y responde a un hidrograma variable. Este hidrograma de entrada corresponde con los datos reales que fueron tomados a la entrada del canal durante los 5 días de nuestro estudio. Vemos como al comienzo de la simulación tenemos una entrada de caudal constante hasta aproximadamente 170.000 s. En este punto aumenta el caudal de entrada hasta $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y se mantiene constante hasta 245.000 s aproximadamente. A continuación hay una importante disminución del caudal de entrada hasta que llega un momento, entre 330.000 y 345.000 s que no entra caudal. A partir de aquí el caudal es muy variable, aumentando y disminuyendo hasta el final de la simulación. Esto puede ser debido a que durante ese día haya habido precipitaciones.

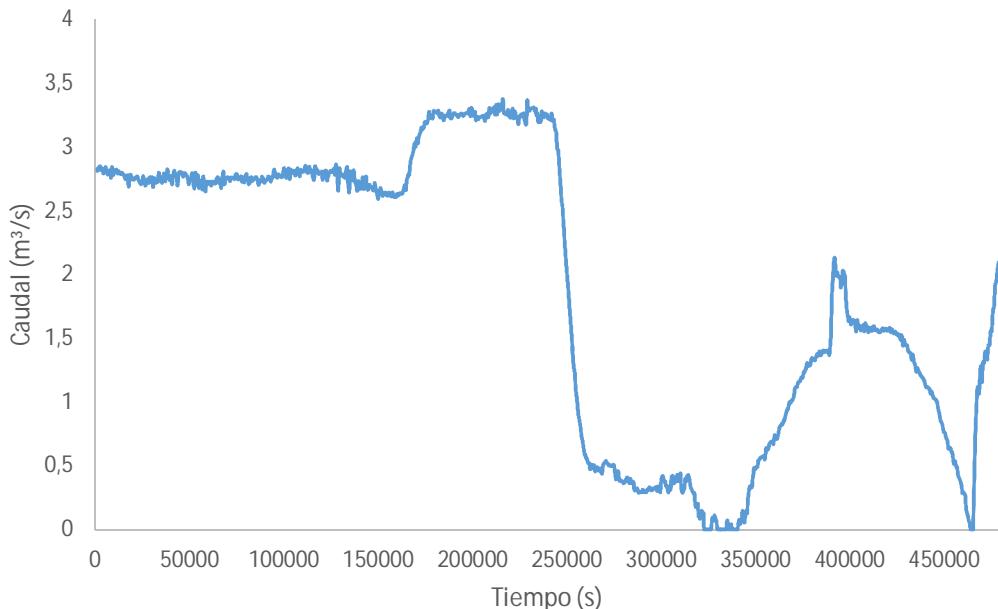


Figura 8.3 Hidrograma de entrada del caso 8

- Condiciones de salida

Como condición de contorno a la salida del canal se impone un número de Froude de 0,6 para asegurar una salida subcrítica del flujo como se indica en la *Tabla 8.3*.

Froude	0,6
---------------	------------

Tabla 8.3 Condición de salida del caso 8

8.4 COMPUERTAS

En este caso tenemos 4 compuertas transversales del tipo que se muestra en la *Figura 8.4* y 19 tomas laterales. La localización de todas ellas se puede observar en las *Figuras 8.0.3* y *8.1.1*. Las compuertas transversales tienen unas alturas objetivo entre 0,75 y 1,2 m dependiendo de la compuerta.

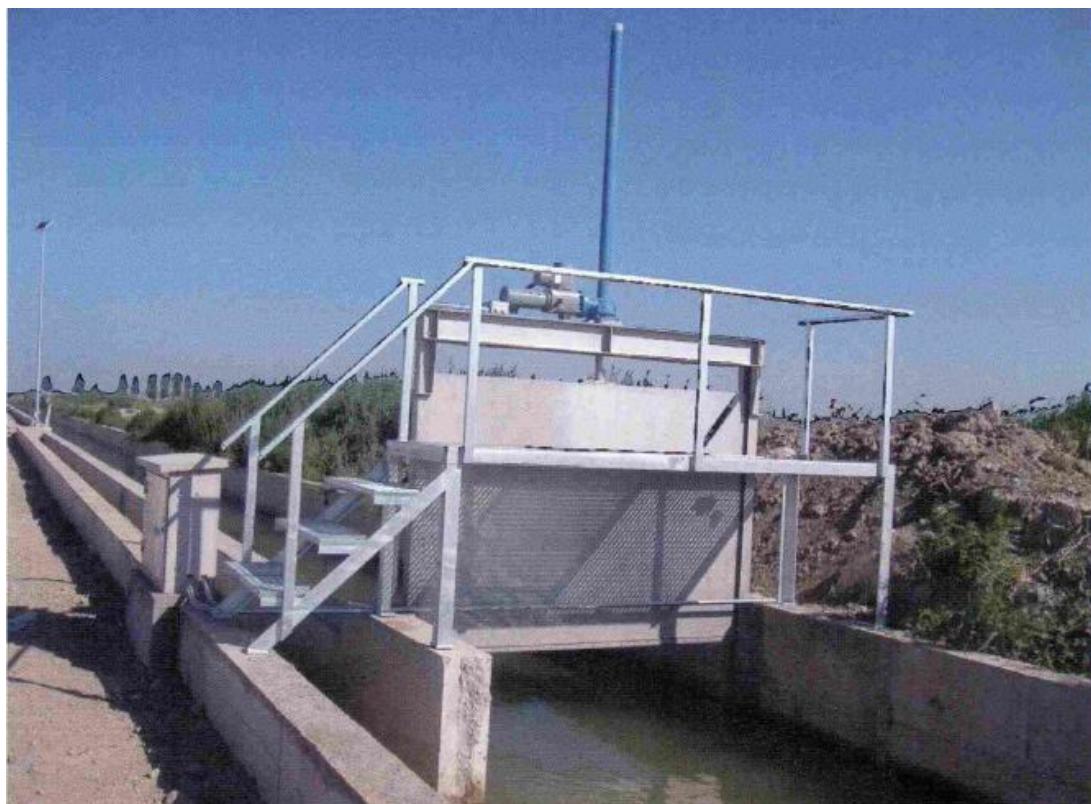


Figura 8.4 Compuerta transversal del canal de Pina de Ebro

Los datos de las compuertas transversales quedan bien explicados en la *Tabla 8.4.1.*

Número de compuerta	1
Posición (m)	3.920
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	1,2
Número de compuerta	2
Posición (m)	7.065
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	1,2
Número de compuerta	3
Posición (m)	8.893
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	1,1

Número de compuerta	4
Posición (m)	10.716
k	0,8
Tipo	Automática
Altura Objetivo (m)	0,75

Tabla 8.4.1 Compuertas transversales de regulación automática del caso 8

Todas las tomas laterales se encuentran repartidas a lo largo del canal de forma no uniforme (ver *Figura 8.1.1*). Al comienzo de la simulación todas ellas se encuentran cerradas excepto la toma lateral 18 que se mantiene con un apertura constante de 0,07 m a lo largo de toda la simulación. Esta toma lateral sirve de ramal para retornar el agua al río. En caso de haber una gran crecida de caudal a la entrada del canal se puede regular el caudal de salida aumentando la apertura de esta toma lateral. A continuación se muestran los datos de las tomas laterales en la *Tabla 8.4.2*.

Número de compuerta	1
Posición (m)	848
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	2
Posición (m)	1.671
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	3
Posición (m)	2.510
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	4
Posición (m)	3.241
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	5
Posición (m)	3.916
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	6
Posición (m)	5.036
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	7
Posición (m)	5.440
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	8
Posición (m)	5.663
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	9
Posición (m)	5.936
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	10
Posición (m)	6.503
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	11
Posición (m)	7.060
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	12
Posición (m)	7.639
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	13
Posición (m)	8.337
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	14
Posición (m)	8.888
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	15
Posición (m)	9.580
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Número de compuerta	16
Posición (m)	10.220
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0
Número de compuerta	17
Posición (m)	10.716
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0
Número de compuerta	18
Posición (m)	11.231
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0,07
Número de compuerta	19
Posición (m)	11.774
k	0,8
Tipo	Lateral
Anchura (m)	0,8
Apertura (m)	0

Tabla 8.4.2 Datos de las tomas laterales del caso 8

8.5 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL

Para este caso, se partieron de los parámetros hallados en el estudio realizado en el apartado 3.8. A partir de éstos parámetros se realizaron aproximadamente 20 simulaciones cambiando la configuración de todos ellos quedando como valores óptimos los valores del estudio, los cuales se muestran en la *Tabla 8.5*. Para la banda muerta se escogió un valor de 0,01 m aunque para este caso habría sido mejor contar con un regulador PID por compuerta como se expone posteriormente, ya que al principio de la simulación las compuertas transversales modifican su posición en exceso.

TI (Periodo de integración del controlador) (s)	2.500
TD (Periodo de derivación del controlador) (s)	0,1
TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)	1.000
BM (Banda muerta) (m)	0,01

Tabla 8.5 Parámetros de las compuertas transversales del caso 8

8.6 EXTRACCIONES DE CAUDAL EN LAS TOMAS LATERALES

Inicialmente, las tomas laterales están cerradas excepto la toma lateral 18 que se utiliza con el fin mencionado anteriormente. A lo largo de la simulación, dependiendo de las necesidades de los regantes las tomas laterales se van abriendo y cerrando según sus necesidades. En este caso las tomas laterales 1, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17 y 19 permanecen cerradas a lo largo de toda la simulación. Nuestro objetivo principal es suministrar al regante el caudal deseado en el momento deseado, para ello se ha partido de este dato y se ha modelizado la geometría de las tomas laterales. El problema añadido ha sido que las tomas laterales tienen una sección circular, con lo cual ha sido necesario modelizar su sección real mediante los parámetros que podemos introducir en la herramienta, es decir, la anchura y la apertura. Se ha seleccionado una anchura fija de 0,8 m para todas las tomas laterales que coincide aproximadamente con el diámetro de las tomas laterales reales, y se ha jugado con la apertura para conseguir el mismo área efectiva. Las variaciones de posición del resto de las tomas laterales se pueden ver en la *Figura 8.6*.

La toma lateral 2 comienza su apertura a los 389.413 s y alcanza un valor de 0,12 m. Desde este instante hasta 391.213 s la toma lateral mantiene esta apertura hasta que en 391.214 s modifica su posición hasta los 0,06 m manteniéndose hasta los 394.213 s. Desde 394.214 s hasta el final de la simulación la toma lateral permanece cerrada. La toma lateral 3 se abre a los 227.828 s hasta una apertura de 0,1 m y se mantiene hasta los 232.629 s. Desde 232.630 s hasta el final de la simulación la toma lateral permanece cerrada. La toma lateral 9 se abre a los 220.824 s hasta una apertura de 0,025 m y se mantiene hasta los 228.626 s. Desde 228.627 s hasta el final de la simulación la toma lateral permanece cerrada. La toma lateral 11 se abre a los 229.627 s hasta una apertura de 0,2 m y se mantiene hasta los 232.028 s. Desde 232.029 s hasta el final de la simulación la toma lateral permanece cerrada. La toma lateral 15 se abre a los 399.429 s hasta una apertura de 0,7 m y se mantiene hasta los 406.630 s. Desde 406.631 s hasta el final de la simulación la toma lateral permanece cerrada. Por último la toma lateral 18 permanece abierta durante toda la simulación con una apertura de 0,07 m.

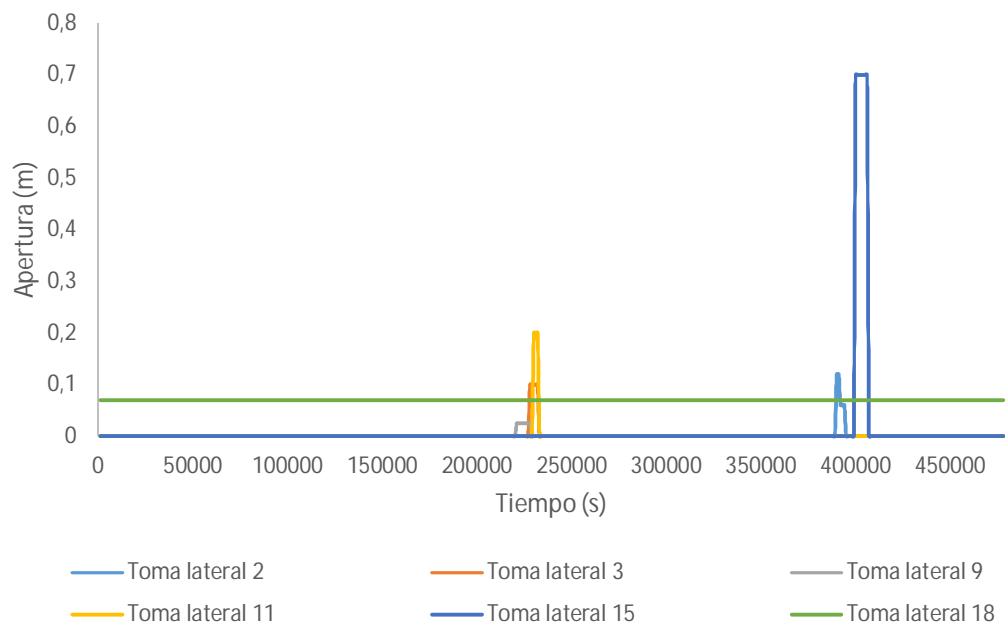


Figura 8.6 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del caso 8

8.7 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN

A la hora de realizar esta simulación se ha tomado como objetivo principal el caudal deseado por los regantes en cada instante. A partir de este objetivo la herramienta de simulación Canalfowmodel regula el caudal del canal de la forma más óptima posible para garantizar el suministro. Una vez obtenidos los resultados se compararán con los datos reales que se obtuvieron y se analizará que solución es más eficiente.

En la *Figura 8.7.1* se muestra la evolución temporal del error de masa cometido en la simulación.

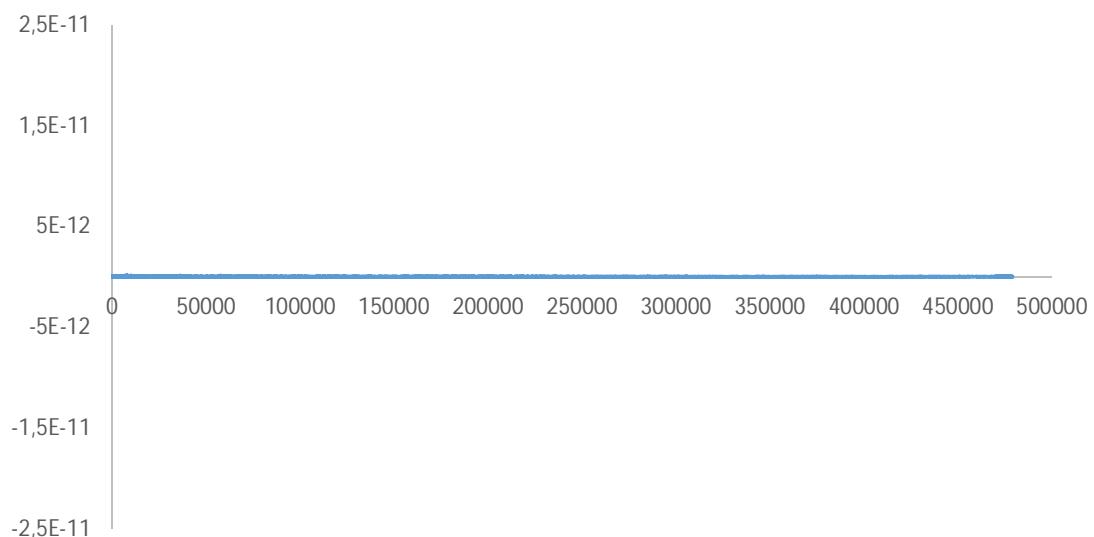


Figura 8.7.1 Evolución temporal del error de masa del caso 8

En la *Figura 8.7.2* se muestra la evolución temporal de los caudales de entrada (línea azul) y salida (línea naranja) del canal. El caudal de entrada se ajusta al hidrograma de entrada de la *Figura 8.3*. Respecto al caudal de salida, se observa que tiene un comportamiento semejante, con su correspondiente retraso temporal. Aproximadamente sobre los instantes 235.000 s y 400.000 s se ve un pico negativo de caudal, correspondiente al caudal desalojado por las tomas laterales y que por lo tanto hace disminuir el caudal de salida del canal.

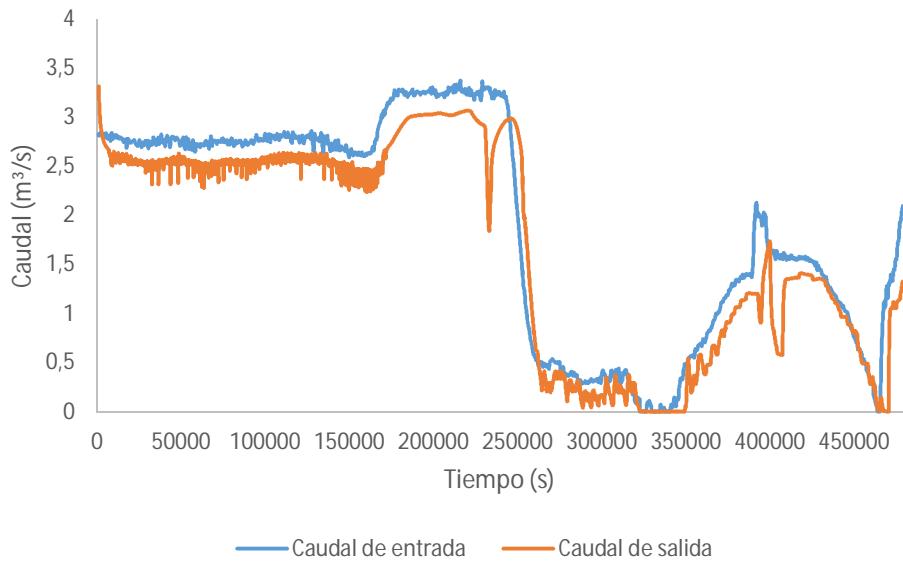


Figura 8.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del caso 8

En la *Figura 8.7.3* se ve un perfil longitudinal del canal en $T=0$. Podemos ver la condición inicial introducida (*Tabla 8.2*) donde todo el canal tiene una altura constante de 1,23 m.

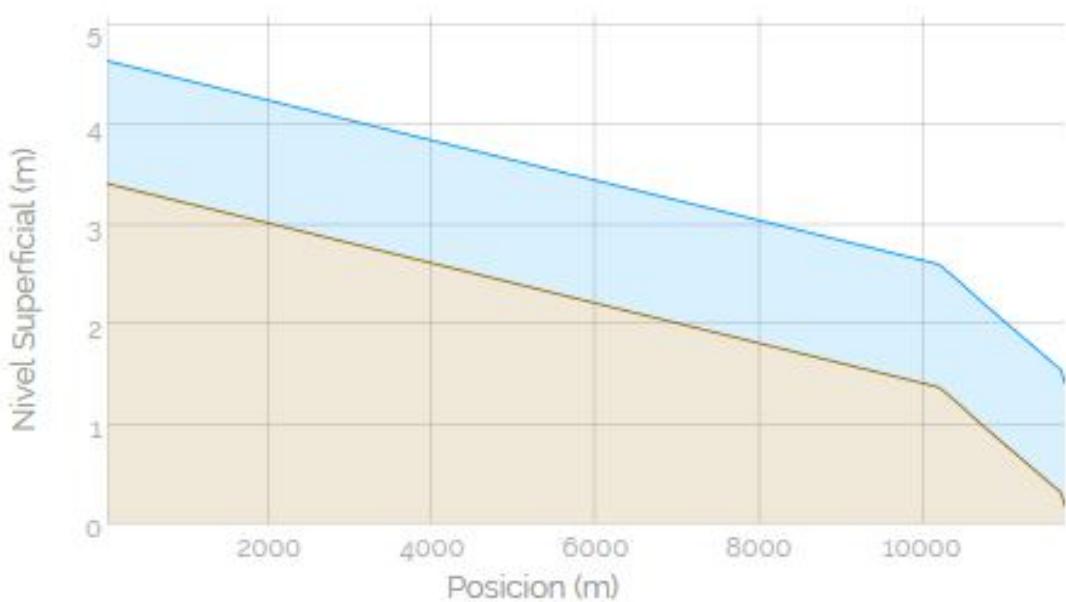


Figura 8.7.3 Perfil longitudinal del canal en $T=0$ s del caso 8

Todos estos resultados se pueden ir comparando a su vez con los datos reales ocurridos durante los 5 días simulados. En la *Figura 8.7.4* se ve un perfil longitudinal del canal en $T=0$. Podemos ver como coincide con la condición inicial mostrada en la *Figura 8.7.3*.

Perfil longitudinal

Se muestra la evolución temporal del tramo simulado

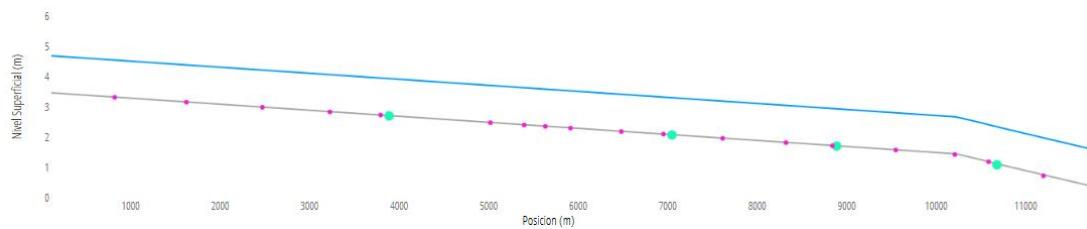


Figura 8.7.4 Perfil longitudinal real del canal en $T=0$ s del caso 8

En la *Figura 8.7.5* se ve un perfil longitudinal del canal en $T=200.000$ s. En este instante de tiempo el canal se encuentra en estacionario, ya que el caudal de entrada ha sufrido un aumento desde el inicio de la simulación y en este instante todas las compuertas transversales se encuentran completamente abiertas para dejar paso al caudal sobrante.

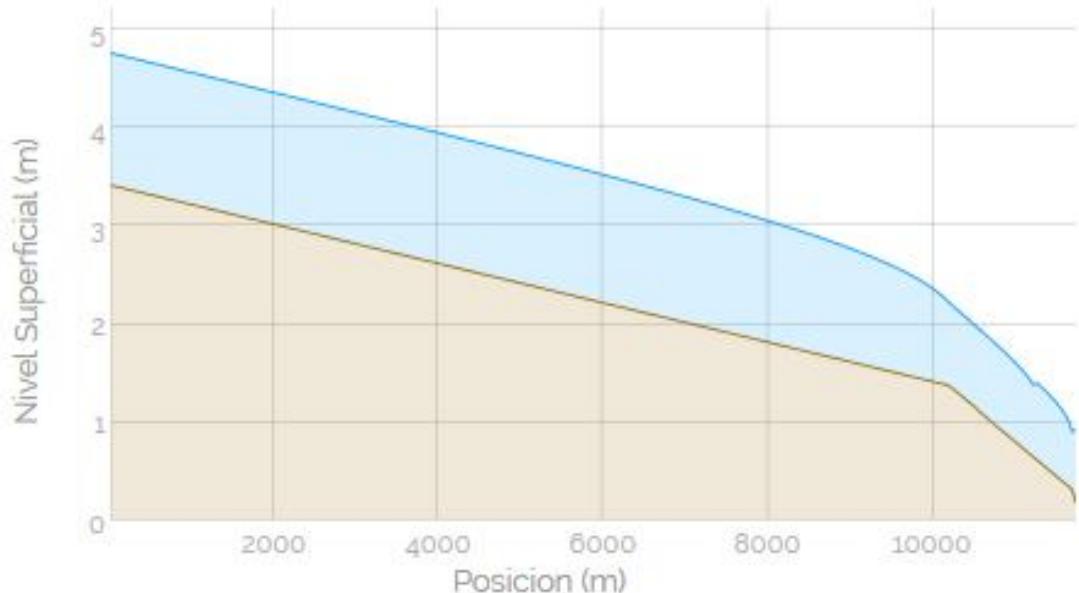


Figura 8.7.5 Perfil longitudinal del canal en $T=200.000$ s del caso 8

A su vez, en la *Figura 8.7.6* se muestra el perfil del caudal que hay a lo largo del canal en $T=200.000$ s. Vemos como hay un caudal constante a lo largo de todo el canal y al final del mismo tenemos una extracción de caudal por la toma lateral 18 de $0,2$ m^3/s aproximadamente.

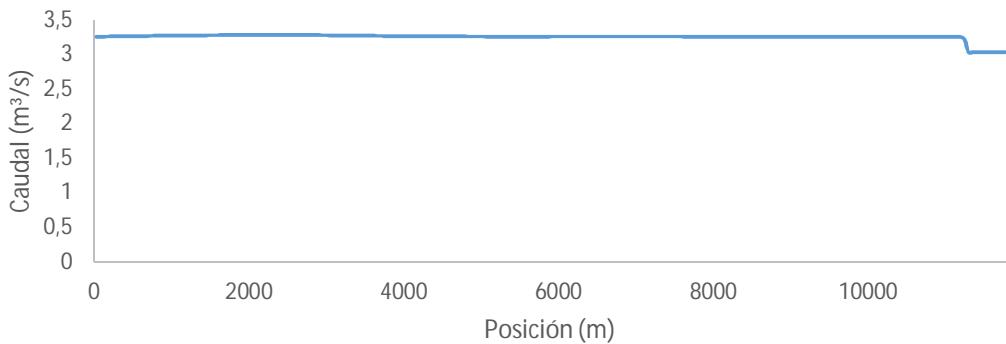


Figura 8.7.6 Perfil longitudinal de caudal en $T=200.000$ s del caso 8

Lo mismo ocurre en la *Figura 8.7.7*.

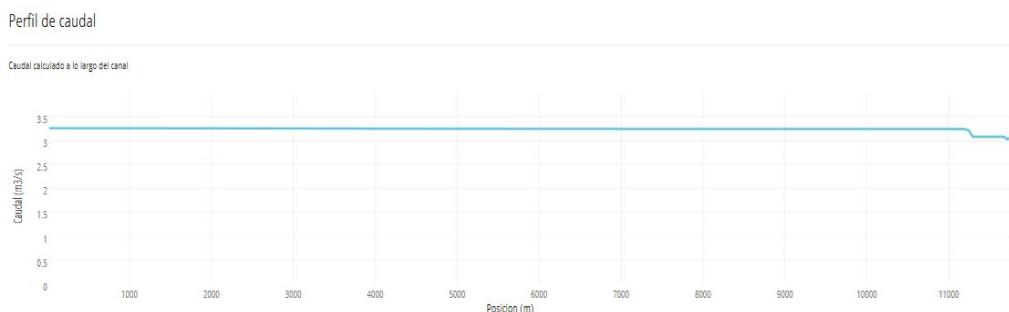


Figura 8.7.7 Perfil longitudinal real de caudal en $T=200.000$ s del caso 8

En la *Figura 8.7.8* se ve un perfil longitudinal de caudal en $T=230.000$ s. En este instante de tiempo se encuentran abiertas dos tomas laterales, la toma lateral 3 y la toma lateral 11, además de la toma lateral 18. Vemos como la toma lateral 3 ubicada a 2.510 m extrae aproximadamente $0,5$ m^3/s . La toma lateral 11 ubicada a 7.060 m extrae $0,9$ m^3/s y la toma lateral 18 mantiene su extracción constante de $0,2$ m^3/s .

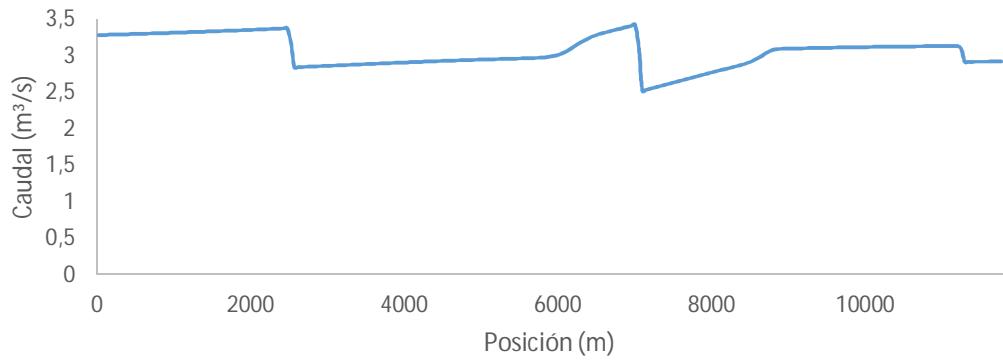


Figura 8.7.84 Perfil longitudinal de caudal en $T=230.000$ s del caso 8

Lo mismo ocurre en la Figura 8.7.9.

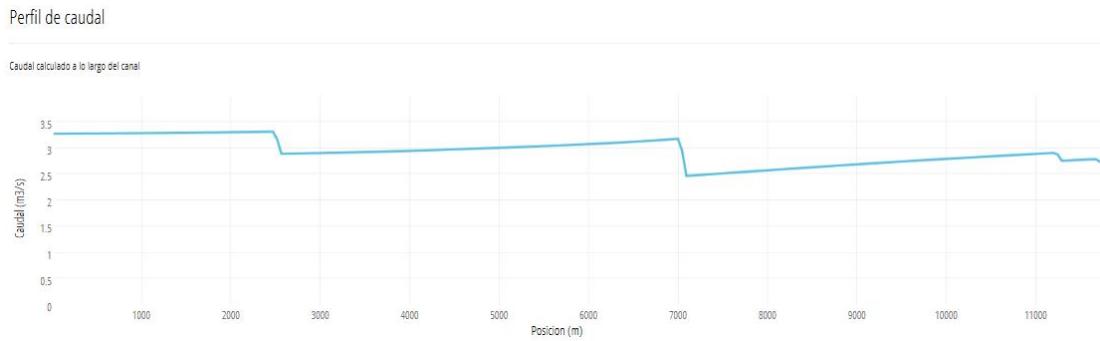


Figura 8.7.9 Perfil longitudinal real de caudal en $T=230.000$ s del caso 8

En la Figura 8.7.10 se ve un perfil longitudinal del canal en $T=321.000$ s. En este instante de tiempo el caudal de entrada es nulo, y por lo tanto todas las compuertas transversales están cerradas para mantener las alturas objetivo. Esto se consigue gracias a que en estos instantes no hay ninguna toma lateral abierta extrayendo caudal del canal.

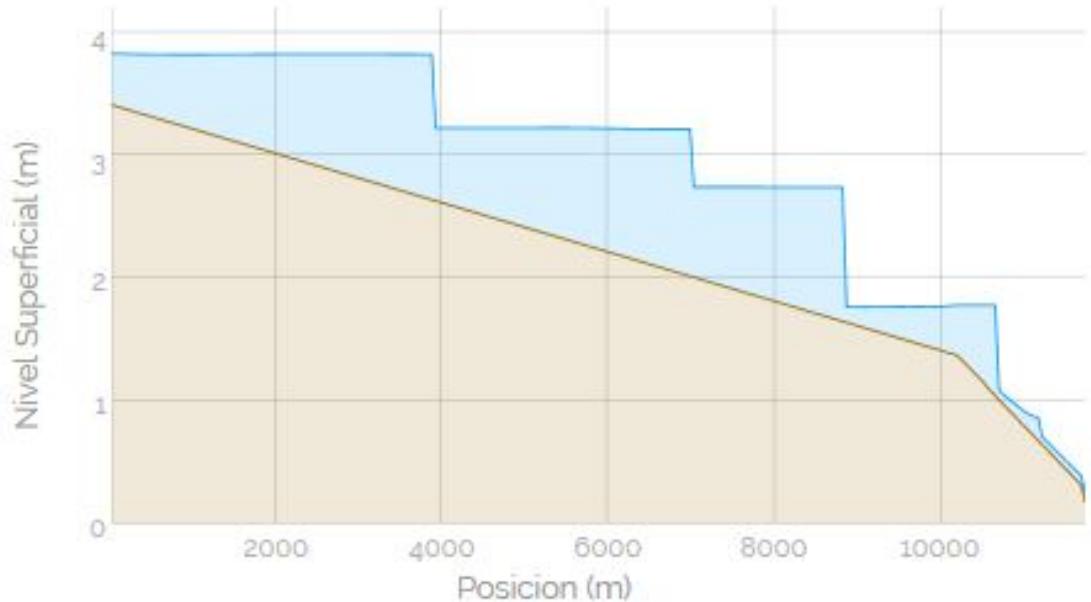


Figura 8.7.10 Perfil longitudinal del canal en $T=321.000$ s del caso 8

En este punto de la simulación es donde varía principalmente el comportamiento del canal. Mientras que en la *Figura 8.7.10* se ve cómo actúan las compuertas transversales, manteniendo las alturas objetivo para abastecer si fuera necesario las tomas laterales, en los datos reales (ver *Figura 8.7.11*) se ve como no actuaron las compuertas transversales, vaciándose el canal. En caso de haber necesitado suministro de caudal algún regante, éste no habría podido satisfacerse.

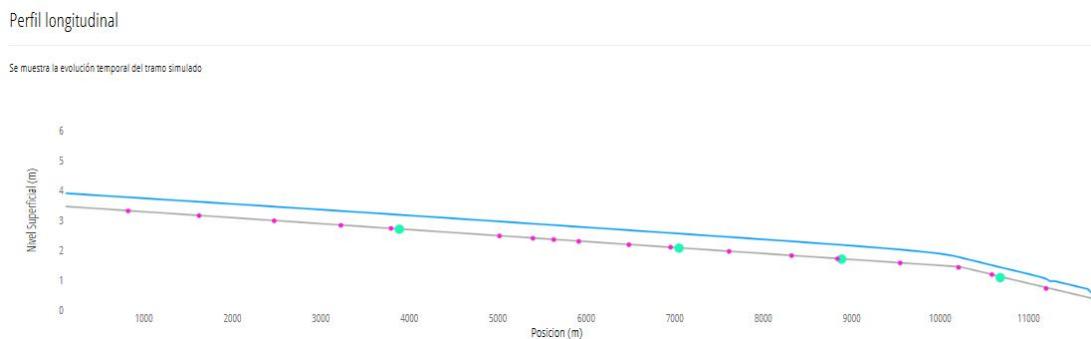


Figura 8.7.11 Perfil longitudinal real del canal en $T=321.000$ s del caso 8

En la *Figura 8.7.12* se ve un perfil longitudinal del canal en $T=405.000$ s. En este instante de tiempo se encuentra abierta la toma lateral 15, ubicada a 9.580 m desde el inicio del canal. Vemos como hay una extracción de caudal en esa posición además de la toma lateral 18. Las compuertas transversales actúan regulando el caudal del canal para conseguir sus alturas objetivo.

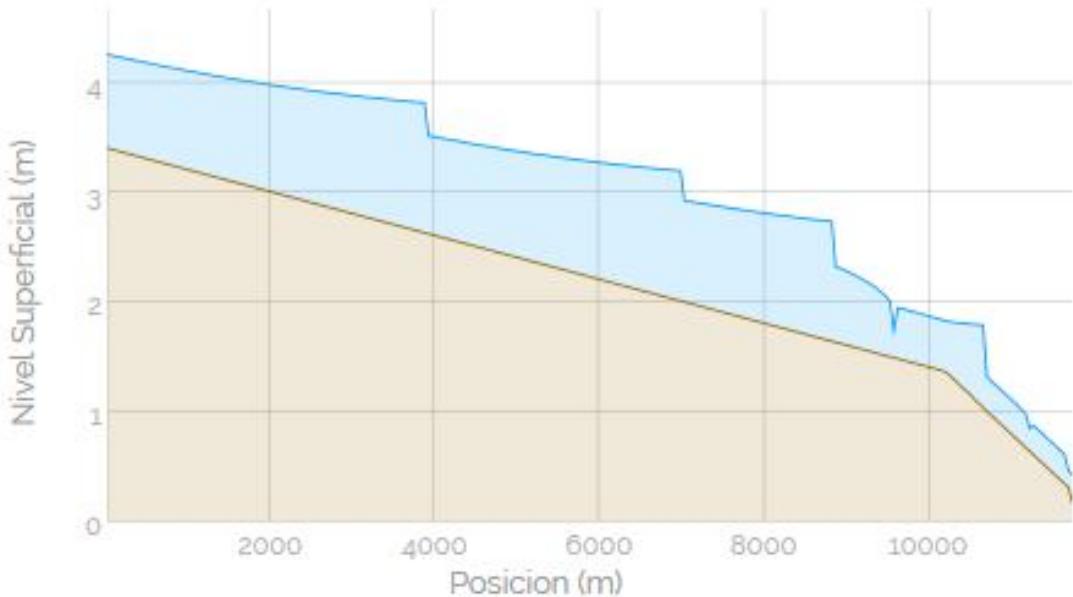


Figura 8.7.12 Perfil longitudinal del canal en $T=405.000$ s del caso 8

En la *Figura 8.7.13* se ve como sólo actúa la compuerta transversal 4, que se encuentra completamente cerrada. Las compuertas transversales 1, 2 y 3 están completamente abiertas dejando el paso abierto. Vemos como nuevamente en caso de abrir una toma lateral el calado en cualquier posición del canal es variable, en este caso sí que habría caudal para suministrar, pero el caudal suministrado variaría por el calado del canal. Es mucho más eficiente una gestión del canal donde se mantiene el calado en cada tramo, asegurando el suministro constante de caudal a las tomas laterales.

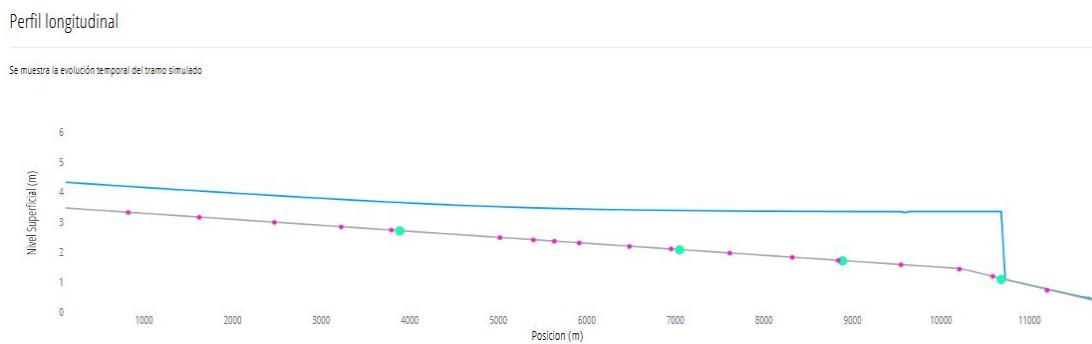


Figura 8.7.13 Perfil longitudinal real del canal en $T=405.000$ s del caso 8

En la *Figura 8.7.14* se ve un perfil longitudinal de caudal en $T=405.000$ s. Vemos claramente como la toma lateral 15 extrae aproximadamente $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ y la toma lateral 18 extrae $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

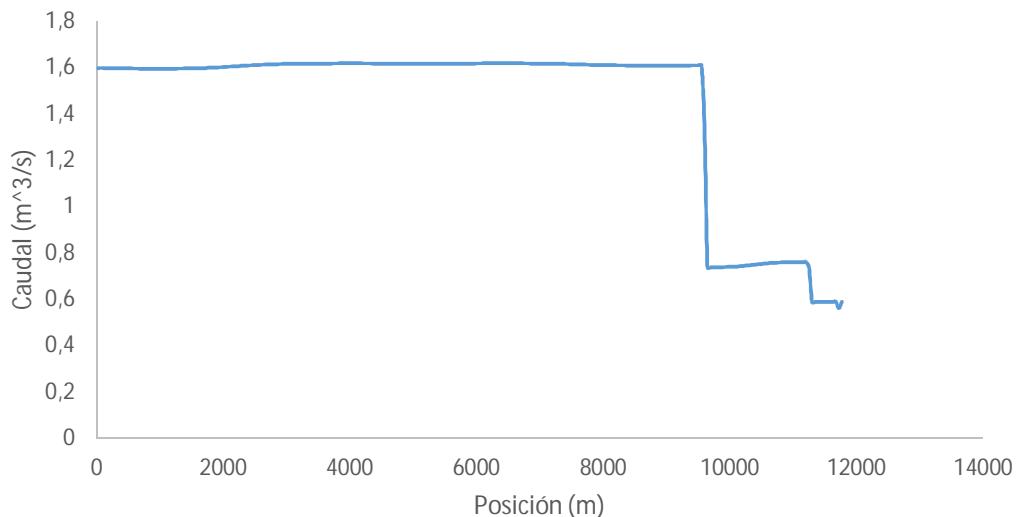


Figura 8.7.14 Perfil longitudinal de caudal en $T=405.000$ s del caso 8

Para analizar ahora con detalle el comportamiento de las compuertas transversales se muestra una figura de cada compuerta por separado. Desde la *Figura 8.7.15* hasta la *Figura 8.7.18* se observan las aperturas de cada compuerta (azul), el nivel superficial del agua antes de cada compuerta (naranja) y la altura objetivo (gris).

En la primera parte de la simulación, hasta aproximadamente 165.000 s tenemos una entrada constante de caudal. La compuerta transversal 1 se mantiene abierta totalmente permitiendo el paso de caudal y así consiguiendo su altura objetivo. Las compuertas transversales 2 y 3 vemos que no actúan igual, estas compuertas están en constante movimiento. Esto ocurre porque el nivel superficial del agua antes de estas dos compuertas es muy similar a la altura objetivo, es decir, con esta entrada de caudal estando las compuertas transversales completamente abiertas más o menos se conseguirían las alturas objetivo. Sería más correcto que éstas compuertas transversales estuvieran completamente abiertas en este tramo de la simulación, ya que evitaría desgaste mecánico y ahorro de energía, además de las ondas que genera en el canal, esto podríamos haberlo hecho aumentando la banda muerta (rango de no actuación) pero nos penalizaría en la parte final de la simulación (a partir de 350.000 s) ya que no se habrían alcanzado tan finamente las alturas objetivo deseadas. Lo bueno de la herramienta Canalfowmodel es que te permite regular los parámetros del regulador PID a tu antojo, pudiendo escoger los parámetros adecuados para que se comporte de la forma deseada por la persona que lo maneja. En la compuerta transversal 4 vemos que su comportamiento es similar a las

compuertas 2 y 3 aunque en este caso los movimientos de apertura y cierre son más pronunciados.

Desde los 165.000 s hasta 250.000 s tenemos un pico en la entrada de caudal, así que todas las compuertas transversales se abren completamente para permitir el paso del caudal sobrante. Aun así vemos como se sobrepasa la altura objetivo de todas las compuertas, pero las compuertas ya se encuentran completamente abiertas (2,8 m).

A continuación tenemos un brusco descenso del caudal de entrada hasta que llega un momento que no entra nada de caudal, con lo cual todas las compuertas se cierran completamente.

Desde aquí hasta el final de la simulación el caudal de entrada va variando y todas las compuertas transversales van modificando sus posiciones consiguiendo sus alturas objetivo.

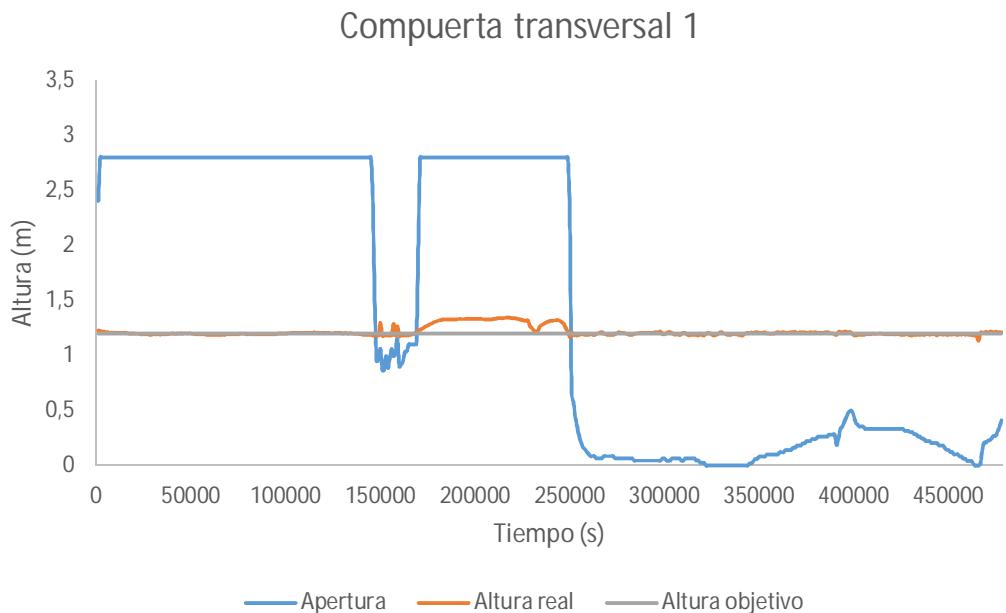


Figura 8.7.15 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del caso 8

Compuerta transversal 2

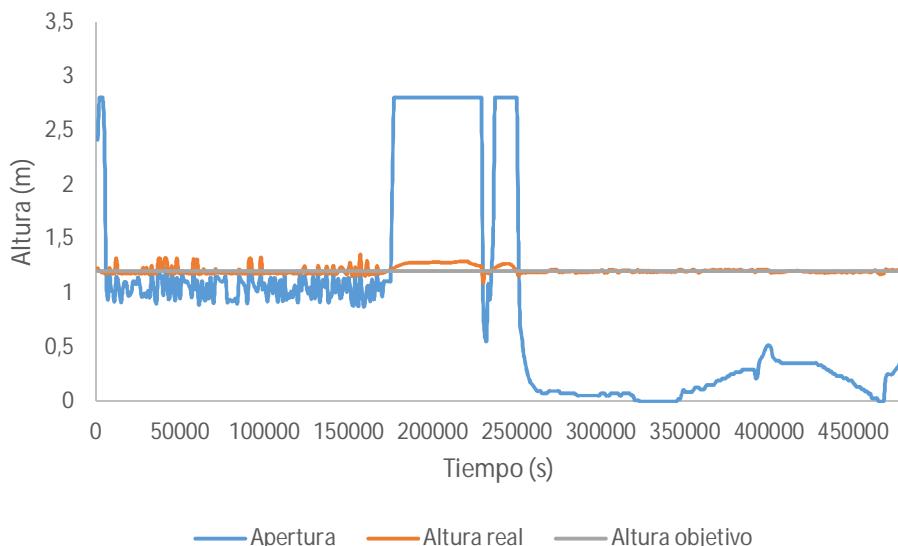


Figura 8.7.16 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del caso 8

Compuerta transversal 3

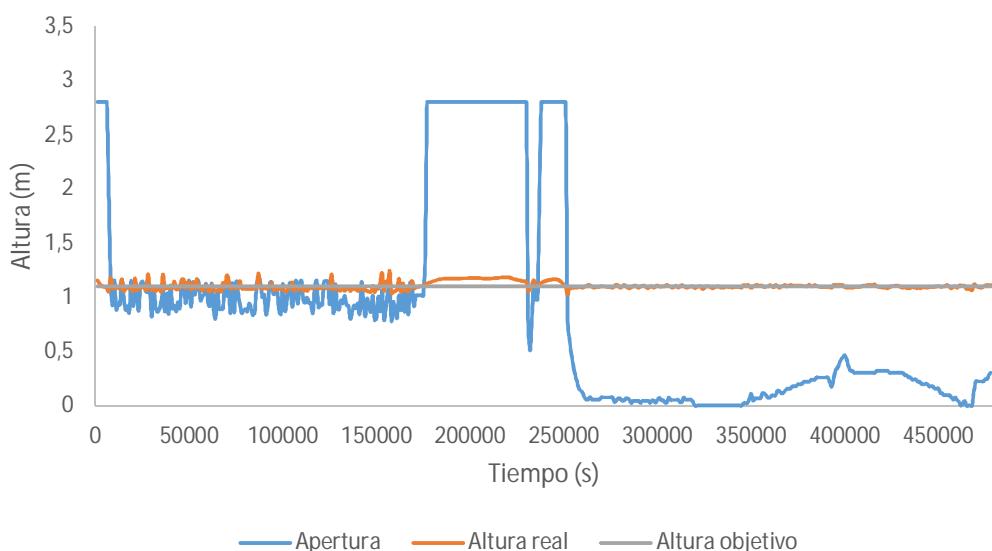


Figura 8.7.17 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del caso 8

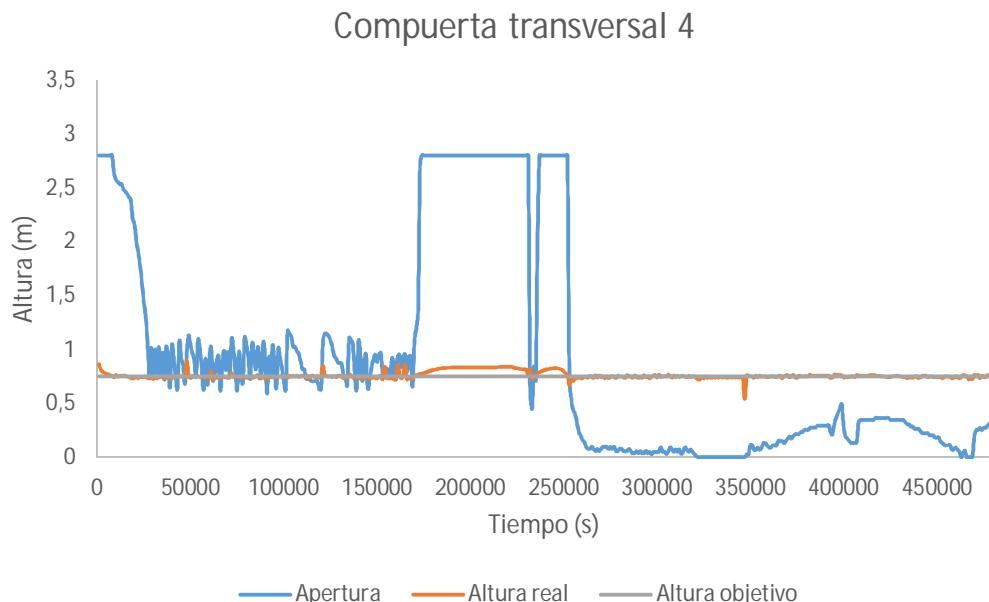


Figura 8.7.18 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del caso 8

Hemos visto como las compuertas transversales consiguen mantener a lo largo de la simulación un calado constante en cada tramo. Desde la *Figura 8.7.19* hasta la *Figura 8.7.22* se muestran los calados reales que se obtuvieron antes de cada compuerta transversal (verde). Vemos como en los datos reales, las compuertas transversales no modificaron correctamente su posición, con lo cual no mantuvieron un calado constante en cada tramo. Esto provoca que las tomas laterales no extraigan el caudal deseado por los regantes. A su vez también se muestran en color rojo los resultados numéricos que obtuvo la herramienta Canalfowmodel al modelizar exactamente lo ocurrido entre estos 5 días.

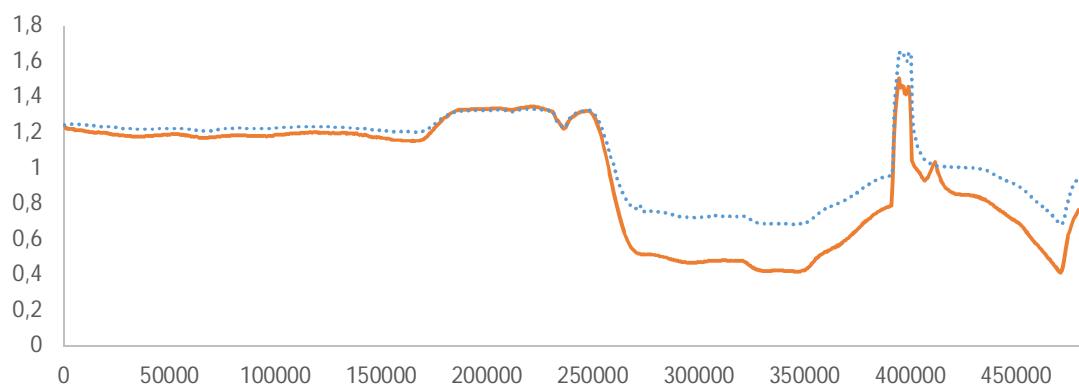


Figura 8.7.19 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 1 del caso 8

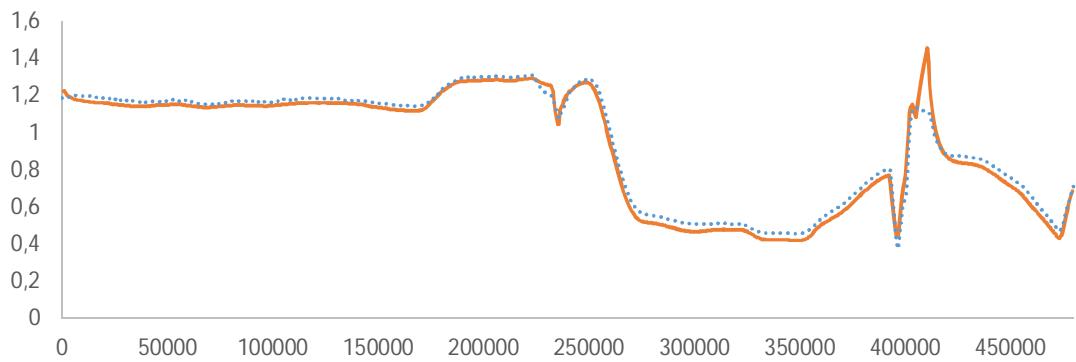


Figura 8.7.20 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 2 del caso 8

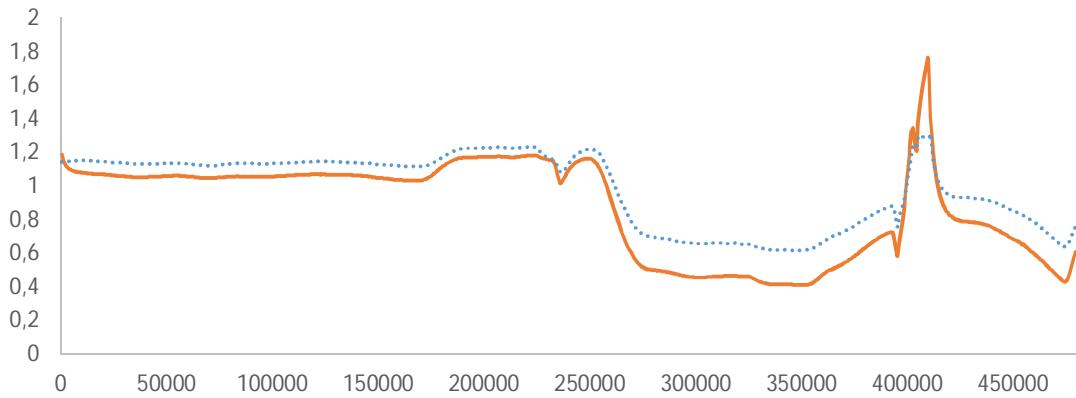


Figura 8.7.21 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 3 del caso 8

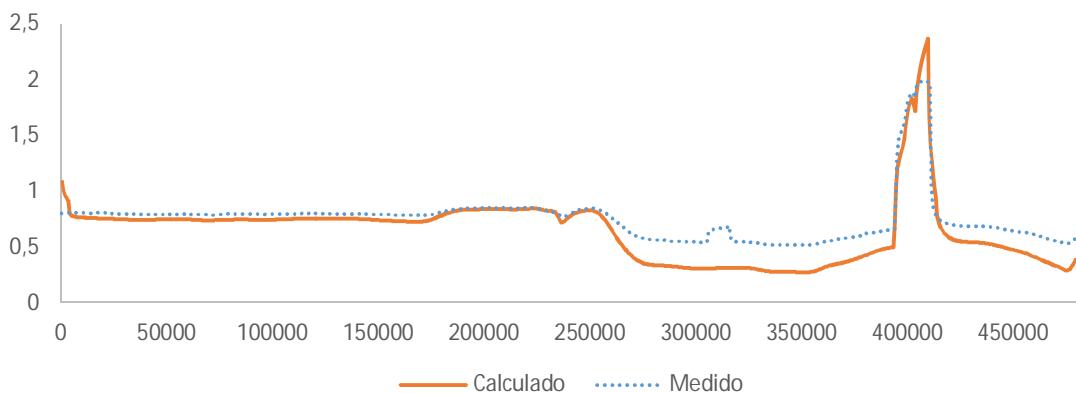
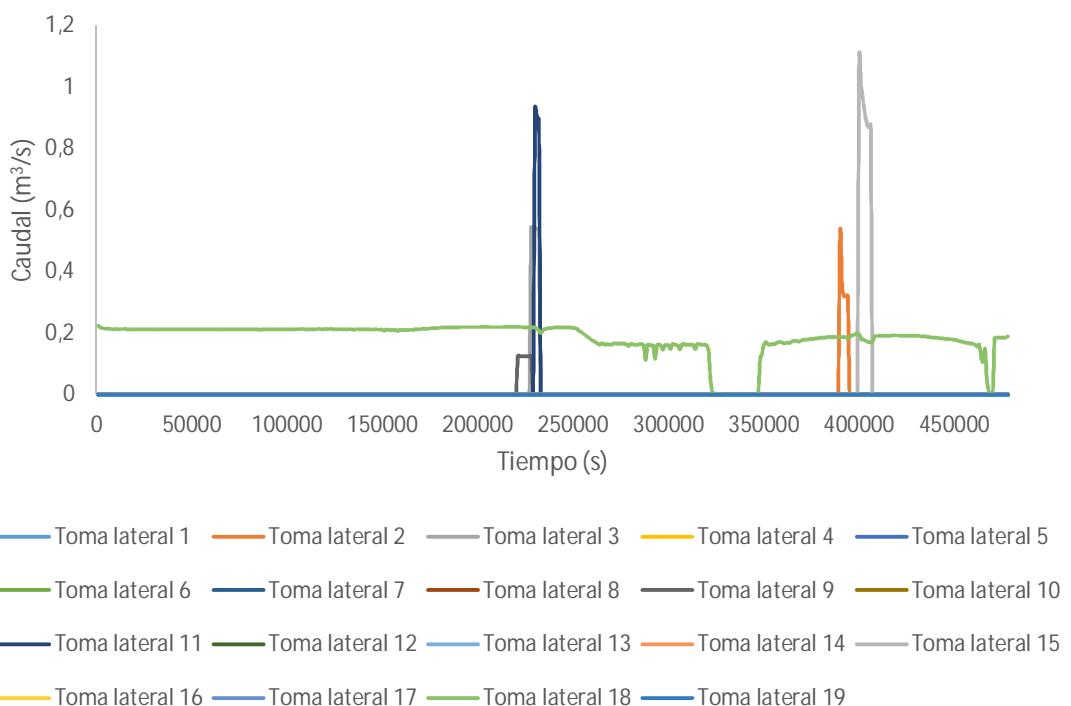


Figura 8.7.22 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 4 del caso 8

Por último, nos queda por ver el comportamiento de las tomas laterales. En la *Figura 8.7.23* podemos ver como las tomas laterales 1, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17 y 19 permanecen cerradas a lo largo de toda la simulación. La toma lateral 2 (naranja) tiene una extracción de caudal a los 389.413 s de $0,52 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta extracción se mantiene durante 1.800 s (30 min). Pasado este tiempo se reduce la apertura de la toma lateral. Esto es debido a que esta toma lateral suministra caudal a una acequia, y esta a su vez suministra caudal a diferentes campos. Durante 30 min han podido estar regando con la misma toma lateral dos regantes diferentes, y pasado este tiempo uno de ellos no necesita más caudal y por tanto se reduce la apertura de la toma lateral. Así pues hasta 394.214 s la extracción de caudal es de $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$.

La toma lateral 3 (gris oscuro) tiene una extracción de caudal de $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 227.828 s y 232.629 s. La toma lateral 9 (marrón) tiene una extracción de caudal de $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 220.824 s y 228.626 s. La toma lateral 11 (azul oscuro) tiene una extracción de caudal de $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 229.627 s y 232.028 s. La toma lateral 15 (gris claro) tiene una extracción de caudal entre $1,1$ y $0,88 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 399.429 s y 406.630 s. En este caso la extracción de caudal no es constante debido a que previamente ha habido un periodo de tiempo donde el caudal de entrada ha sido $0 \text{ m}^3/\text{s}$, con lo cual en el momento de apertura de la toma lateral 15 hay una pequeña pérdida de calado en el canal y hace que disminuya el caudal de extracción. Por último la toma lateral 18 tiene una extracción constante de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ excepto en los períodos de tiempo que el caudal de entrada es $0 \text{ m}^3/\text{s}$ y por lo tanto la extracción de caudal por esta toma lateral también es $0 \text{ m}^3/\text{s}$.



Estos caudales obtenidos en las tomas laterales durante la simulación se pueden comparar con los datos de los caudales reales que se obtuvieron durante esos días (ver *Figura 8.7.24*). Si comparamos ambas figuras podemos ver como los caudales de extracción obtenidos son prácticamente idénticos.

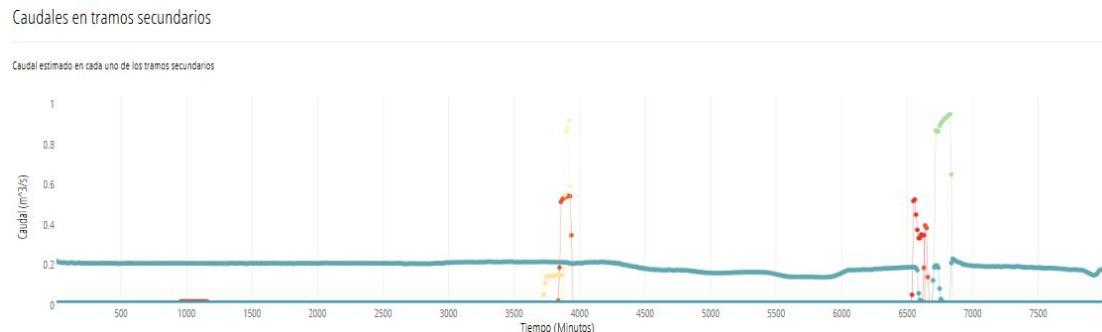


Figura 8.7.24 Evolución temporal del caudal de salida real de las tomas laterales del caso 8

Una vez presentados todos los resultados de la simulación y comparados con los datos reales, se observa que el regulador PID realiza una gestión más eficaz del canal de riego de Pina de Ebro, asegurando unos niveles superficiales constantes en cada tramo, lo que permite tener unas reservas hídricas dentro del propio canal, preparadas para ser desalojadas en cualquier momento por las tomas laterales y así satisfacer las demandas de los regantes tanto en cantidad como en el instante de suministro.