

## **5 – EXPERIMENTOS REALIZADOS**

Como ya se ha comentado en anteriores capítulos, el objetivo de esta tesina es desarrollar dos sistemas de control, uno basado en el modelo hidrológico de Muskingum, y otro en el modelo hidráulico de Hayami, y realizar un estudio comparativo entre ambos.

Dicho estudio se realiza mediante una serie de experimentos numéricos con ambos sistemas de control, en los cuales se estudia la efectividad del controlador (estabilidad y velocidad de convergencia) frente a cambios de consigna y a perturbaciones.

Las distintas simulaciones se realizan sobre dos tipos de canales, uno de cuatro tramos de idéntica longitud, y otro de ocho tramos desiguales.

A continuación se presentan cuáles son los indicadores de rendimiento utilizados, las características de los canales simulados, los experimentos realizados y los resultados obtenidos.

### **5.1 – INDICADORES DE RENDIMIENTO UTILIZADOS**

La finalidad de utilizar indicadores de rendimiento consiste en disponer de una herramienta que permita comparar cuál es la respuesta de uno u otro controlador, frente a una acción sobre el sistema, sea una variación del nivel de consigna o una perturbación generada por una extracción ilegal o una aportación desconocida.

Los indicadores utilizados están basados en tres conceptos: la velocidad de convergencia, el error en la consigna y la energía de control.

#### **5.1.1 – Indicadores de tiempo de convergencia**

Se considera que el nivel  $y_i$  aguas abajo de un tramo  $i$  (nivel en la *zona de almacenamiento*) ha alcanzado su valor de consigna en el instante  $t_c$  cuando se cumple la siguiente condición:

$$Si \forall t > t_c, \quad |y_i^{sp} - y_i(t)| < 0,02 \quad (5.1)$$

donde  $y_i^{sp}$  es el nivel de consigna en el tramo  $i$ .

Se considera una tolerancia de 2 centímetros debido al error que se produce en el modelo hidráulico que realiza la simulación del canal. Es decir, se supone que el modelo hidráulico presenta un error inherente de unos 2 centímetros, de modo que cuando la diferencia entre el nivel y la consigna es inferior a esos 2 centímetros, el modelo ya ha convergido en el tramo  $i$ .

Para considerarse que todo el canal ya ha convergido, todos los tramos deben haberlo hecho. El tiempo de convergencia del canal  $T_c$  será entonces:

$$Si \forall i = 1, \dots, N; \forall t > T_c \quad |y_i^{sp} - y_i(t)| < 0,02 \quad (5.2)$$

### **5.1.2 – Indicadores de error en la consigna**

Una vez se considera que un tramo ha convergido, se puede determinar cuál es el error en la consigna en cualquier instante de tiempo. No obstante, se suele utilizar como indicador del error en la consigna el error que se produce en el último instante de la simulación, al final de ésta. Siendo  $y_i^{sp}$  la consigna de nivel en el tramo  $i$ , y  $t_s$  el tiempo final de la simulación, el error en la consigna en dicho tramo se determina como el valor absoluto de la diferencia entre el nivel alcanzado y el deseado, es decir

$$EN_i = |y_i^{sp} - y_i(t_s)| \quad (5.3)$$

La suma de los errores cometidos en cada uno de los tramos, da una idea del error cometido en todo el canal:

$$ENT = \sum_{i=1}^N EN_i \quad (5.4)$$

### **5.1.3 – Indicadores de la energía de control**

Un problema que pueden presentar los algoritmos de control consiste en que su gestión sobre las aberturas de compuertas no sea eficiente, realizando movimientos bruscos de las mismas. Estos movimientos bruscos pueden llegar a provocar frentes de onda, de modo que se generen oscilaciones del nivel, dificultando el trabajo del controlador. La generación de frentes de onda (movimiento no permanente rápidamente variable) no es capaz de producirse en las simulaciones realizadas, ya que el modelo hidráulico utilizado no lo contempla (movimiento no permanente gradualmente variado), pero en un canal real sí que pueden producirse estos frentes de onda. Como el objetivo final del desarrollo de un sistema de control es la implementación del mismo en un caso real, este problema debe de evitarse, por ello se realiza una evaluación del movimiento de las compuertas.

Para poder contabilizar los movimientos de compuerta se usa el indicador del movimiento total de la compuerta  $i$  en la forma

$$MC_i = \left[ \sum_{t=t_0}^{t_s} (u_i(t) - u_i(t-1)) \right] - |u_i(t_0) - u_i(t_s)| \quad (5.5)$$

Este indicador informa de cuánto se ha movido la compuerta respecto a la abertura inicial en  $t_0$  y la final en  $t_s$ . De este modo calcula cuáles han sido los movimientos innecesarios para alcanzar la abertura final partiendo desde la abertura inicial.

Un valor de  $MC_i = 0$  indicaría que la abertura de la compuerta se ha producido de un modo progresivo, en cambio, un valor elevado indica que para alcanzar la abertura final se han producido fuertes oscilaciones.

Se denominan indicadores de la energía de control porque hacen referencia a la energía extra invertida en el movimiento de las compuertas.

El movimiento de las N compuertas indica el total de energía “malgastada” por el controlador:

$$MCT = \sum_{i=1}^N MC_i \quad (5.6)$$

## **5.2 – CARACTERÍSTICAS DE LOS CANALES SIMULADOS**

Los canales simulados en la fase experimental son dos: un primer canal de 6000 metros, con cuatro tramos iguales, y un segundo canal de 19500 metros con ocho tramos desiguales.

Ambos canales presentan las mismas condiciones geométricas y los mismos parámetros de tramo y de compuerta:

<b><i>Parámetros del tramo</i></b>	
Pendiente (mm/m):	0,0005
Ancho (m):	4
Coefficiente de rugosidad de Manning (s/m <sup>1/3</sup> ):	0,014
Ancho de compuerta (m):	4
Coefficiente de desagüe de la compuerta (adimensional):	0,6
Área en planta de la <i>zona de almacenamiento</i> (m <sup>2</sup> ):	20
Coefficiente de desagüe del vertedero lateral (adimensional):	1,84
Longitud del vertedero lateral (m):	1,75

*Tabla 5 – Parámetros hidráulicos de los tramos de ambos canales*

Las condiciones hidráulicas iniciales de cada tramo no se eligen de un modo arbitrario. Se toman unos valores de caudales y de niveles a final de cada tramo de modo que al determinar las curvas de remanso, éstas sean del tipo M1. Con este tipo de curva, se consigue que el canal presente un régimen lento (canal tipo M), y se evita un cambio de régimen, ya que los cambios de nivel, que se producen al final del tramo en la *zona de almacenamiento*, no serán próximos al crítico.

Para determinar las condiciones iniciales, se han fijado primero los calados. Seguidamente, se han calculado los calados normales, y se han escogido unos niveles iniciales que sean superiores a los calados normales. Con estos valores de caudales y calados, se consigue una velocidad media en todo el canal de 0,7 m<sup>3</sup>/s (velocidad lenta), un número de Froude Fr<1 (régimen lento), y además, que la lámina de agua no cambie en ninguna sección, ni en ningún instante (régimen permanente).

Las condiciones iniciales de los tramos de los dos canales simulados son las siguientes:

<b>Canal 1</b>	L (m)	$h_v$ (m)	Y (m)	$Q_c$ (m <sup>3</sup> /s)
Tramo 1	1500	1'397	1'662	4'27
Tramo 2	1500	1'196	1'753	3'84
Tramo 3	1500	0'829	1'088	2'50
Tramo 4	1500	-	0'744	2'08
<b>Canal 2</b>				
Tramo 1	2000	1'695	1'936	5'83
Tramo 2	2000	1'482	1'812	5'45
Tramo 3	5000	1'387	1'695	4'82
Tramo 4	3000	1'339	1'584	4'27
Tramo 5	3000	1'192	1'445	3'91
Tramo 6	1500	1'012	1'338	3'48
Tramo 7	1500	0'952	1'198	2'88
Tramo 8	1500	-	0'698	2'49

*Tabla 6 – Longitud, altura del vertedero y condiciones iniciales en cada tramo de cada canal*

En la cabecera de cada canal existe un depósito que presenta un nivel constante. Este nivel constituye la condición de contorno aguas arriba. Como muestra la *Figura 12*, aguas abajo de cada canal, en el último tramo, no existe vertedero lateral, sin embargo, en los tramos finales de cada canal sí que existe un vertedero. Dicho vertedero constituye la condición de contorno aguas abajo. Entonces, el nivel del embalse situado en cabecera del canal y la altura del vertedero situado en el extremo final del canal constituyen las condiciones de contorno del problema. Son las siguientes:

<b>Condiciones de contorno</b>	<b>Canal 1</b>	<b>Canal 2</b>
Aguas arriba: Nivel del embalse (m)	1,662	2,000
Aguas abajo: Altura del vertedero (m)	0,313	0,212

*Tabla 7 – Condiciones de contorno en cada canal*

### **5.3 – EXPERIMENTOS REALIZADOS**

Para realizar el análisis del comportamiento de los dos controladores, se han considerado dos directrices: cambios de consigna y estabilidad frente a perturbaciones.

En el primer caso, el objetivo es cambiar el nivel en uno o varios tramos del canal, de modo que se produce un aumento o disminución del caudal vertido lateralmente en el tramo en que se produce la variación de nivel. Este cambio en el caudal lateral permite satisfacer la nueva demanda. Si el cambio se produce

rápidamente, en el caso de un aumento de caudal, se sirve la nueva demanda de un modo eficaz (una respuesta lenta podría provocar la queja de los usuarios del canal); en el caso de una disminución de caudal, se produce un ahorro de agua, (una respuesta lenta provocaría que se estuviera entregando más agua de la debida, de modo que esta agua se perdería).

En el segundo caso, se pretende mantener el nivel invariable frente a una perturbación externa, sea una extracción o una aportación constante en el tramo. Estas perturbaciones son simuladas mediante una bajada o subida brusca de vertedero lateral correspondiente al tramo en que se produce la perturbación.

Para todos los experimentos se parte de un estado estacionario definido por las condiciones iniciales comentadas con anterioridad. A partir de un determinado instante ( $t=30$  minutos), se ejecutan los cambios descritos. La ejecución de los cambios no se demora hasta los 30 minutos para asegurar que el canal se encuentra en estado estacionario, ya que en los primeros instantes de simulación, el canal se encuentra en una fase transitoria, debido al modelo hidráulico.

Los experimentos realizados son los siguientes:

### *CANAL 1: CANAL DE CUATRO TRAMOS IGUALES*

- Experimento 1: Cambio de nivel en el tercer tramo utilizando el modelo de Muskingum. (MK1)
- Experimento 2: Cambio de nivel en el tercer tramo utilizando el modelo de Hayami. (HY1)
- Experimento 3: Perturbación en el segundo tramo utilizando el modelo de Muskingum. (MK2)
- Experimento 4: Perturbación en el segundo tramo utilizando el modelo de Hayami. (HY2)
- Experimento 5: Perturbación en los tramos primero y tercero utilizando el modelo de Muskingum. (MK3)
- Experimento 6: Perturbación en los tramos primero y tercero utilizando el modelo de Hayami. (HY3)

### *CANAL 2: CANAL DE OCHO TRAMOS DESIGUALES*

- Experimento 1: Cambio de nivel en el quinto tramo utilizando el modelo de Muskingum. (MK4)
- Experimento 2: Cambio de nivel en el quinto tramo utilizando el modelo de Hayami. (HY4)
- Experimento 3: Perturbación en el cuarto tramo utilizando el modelo de Muskingum. (MK5)
- Experimento 4: Perturbación en el cuarto tramo utilizando el modelo de Hayami. (HY5)
- Experimento 5: Perturbación en los tramos tercero, quinto y séptimo utilizando el modelo de Muskingum. (MK6)
- Experimento 6: Perturbación en los tramos tercero, quinto y séptimo utilizando el modelo de Hayami. (HY6)

### **5.3.1 – CANAL 1: CANAL DE CUATRO TRAMOS IGUALES**

El canal 1 es un canal de 6000 metros de longitud, dividido en cuatro tramos de 1500 metros cada uno.

Las condiciones iniciales y condiciones de contorno de este canal quedan reflejadas en la siguiente tabla:

<b>Condiciones iniciales</b>	<b>Y(m)</b>	<b>Q<sub>c</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>
Tramo 1	1,662	4,27
Tramo 2	1,753	3,84
Tramo 3	1,088	2,50
Tramo 4	0,744	2,08
<b>Condiciones de contorno</b>		
Aguas arriba: Nivel del embalse (m)		1,662
Aguas abajo: Altura del vertedero (m)		0,313

*Tabla 8 – Condiciones iniciales y condiciones de contorno en el canal 1*

Los parámetros utilizados en cada controlador son:

<b>Parámetros</b>	<b>Muskingum</b>	<b>Hayami</b>
Periodo de muestreo	250 segundos	100 segundos
$\lambda$	6	20

*Tabla 9 – Parámetros utilizados por cada controlador en el canal 1*

### ***Experimento 1 (MK1)***

En este experimento se simula un cambio de consigna en el tercer tramo en el instante  $t = 0,5$  horas = 1800 segundos. El cambio de consigna consiste en un incremento de 20 centímetros, de modo que el nivel en el tercer tramo ha de pasar de un valor de 1,088 metros a 1,288 metros. Este experimento permite analizar el efecto sobre los tramos de canal situados aguas arriba de dicho cambio.

Debido a que el nivel en el tercer tramo debe aumentar, en la *Figura 20* se puede observar que la tercera compuerta se abre para aumentar el caudal entrante en el tercer tramo y la cuarta compuerta se cierra para mantener el caudal circulante en el cuarto tramo. Aguas arriba, la primera y segunda compuertas se abren para aumentar el caudal circulante, con objeto de poder satisfacer la demanda en el tercer tramo. Ambas compuertas presentan unas oscilaciones debido a que por un lado quieren aumentar el caudal circulante por ellas, pero por otro deben mantener su nivel constante.

Observando la *Figura 21*, el nivel en el segundo tramo es el que presenta una mayor desviación respecto a su consigna, debido a que se encuentra más cerca de la perturbación. En cambio, el nivel en el primer tramo es el que tarda más en converger, ya es el que se encuentra más alejado de la perturbación.

	<b>TC</b> (seg)	<b>EN</b> (m)	<b>MC</b> (m)
Tramo 1	12000	0,0047	0,3272
Tramo 2	9750	0,0026	0,2838
Tramo 3	7000	0,0004	0,0343
Tramo 4	0	0,0000	0,0069
<b>Canal 1</b>	12000	0,0077	0,6522

*Tabla 10 – Indicadores de rendimiento del experimento 1 en el canal 1*

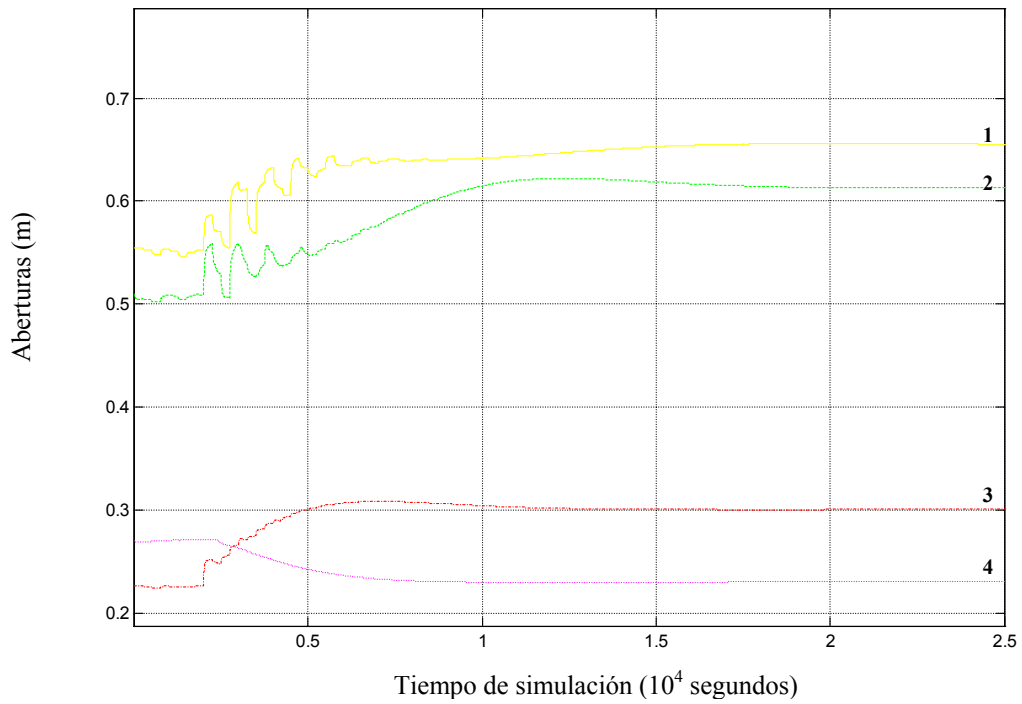


Figura 20. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 1 del canal 1  
Experimento MK1

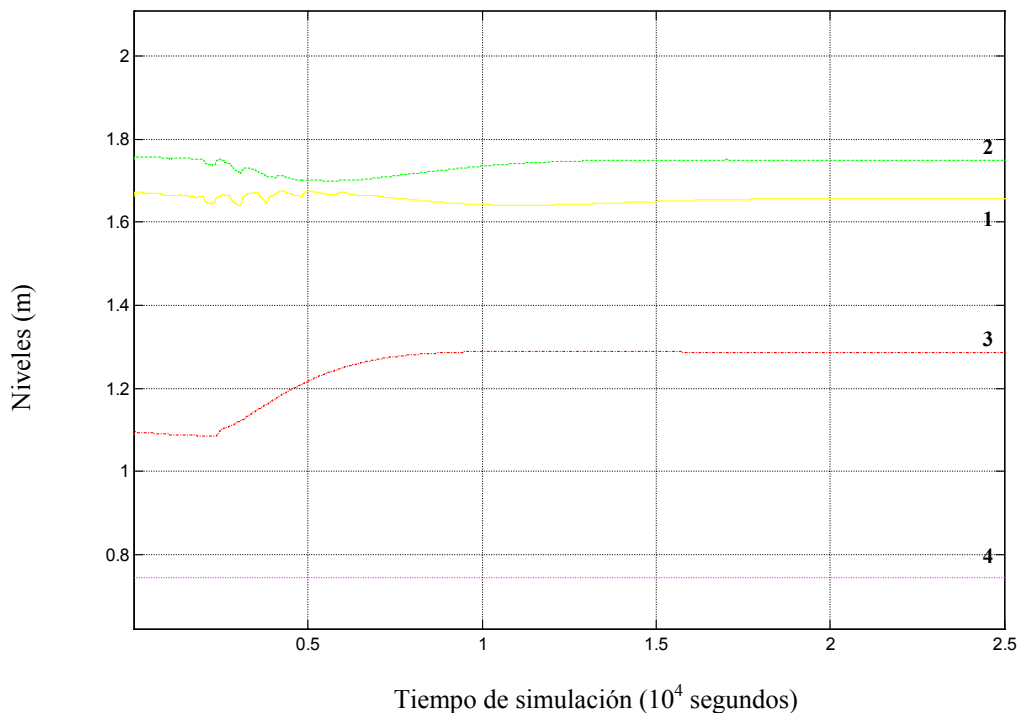


Figura 21. – Evolución de niveles (m) en el experimento 1 del canal 1  
Experimento MK1



### ***Experimento 2 (HY1)***

En este experimento se simula un cambio de consigna en el tercer tramo en el instante  $t = 0,5$  horas = 1800 segundos. El cambio de consigna consiste en un incremento de 20 centímetros, de modo que el nivel en el tercer tramo ha de pasar de un valor de 1,088 metros a 1,288 metros.

El comportamiento del canal, en líneas generales, es parecido al que se da en el experimento 1, no obstante, existen diferencias bastante ostensibles. La *Figura 22* muestra que las tres compuertas que aumentan sus aberturas para aumentar el caudal circulante en los tres primeros tramos, presentan una respuesta mucho más rápida que en el experimento 1, alcanzan un valor próximo a la abertura final mediante un incremento mucho más acusado. Además, el periodo en que las compuertas uno y dos presentan oscilaciones es menor.

Según la *Figura 23* Los niveles en los tramos primero y segundo no se ven tan afectados como en el experimento 1, y gracias a la rápida y enérgica respuesta de sus correspondientes compuertas, convergen con una mayor rapidez.

El error al final de la simulación, aunque es despreciable, es ligeramente superior al cometido en el experimento 1. Este fenómeno es debido a un tiempo de simulación menor, y a una mayor sensibilidad del modelo de Hayami frente a los errores inherentes al modelo hidráulico.

La respuesta de las compuertas, a pesar de ser más enérgica y agresiva que en el experimento 1, es energéticamente más eficiente, como demuestra el indicador MC.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	2200	0,0071	0,2686
Tramo 2	2400	0,0033	0,2814
Tramo 3	6800	0,0042	0,0288
Tramo 4	0	0,0001	0,0034
<b>Canal 1</b>	6800	0,0147	0,5822

*Tabla 11 – Indicadores de rendimiento del experimento 2 en el canal 1*

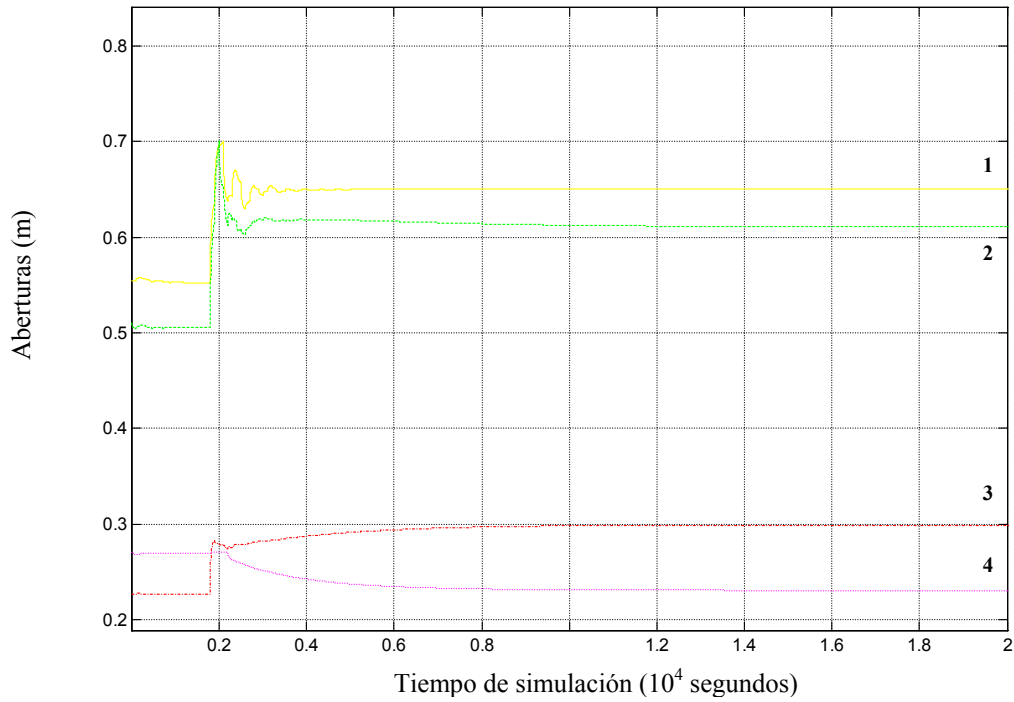


Figura 22. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 2 del canal 1  
Experimento HY1

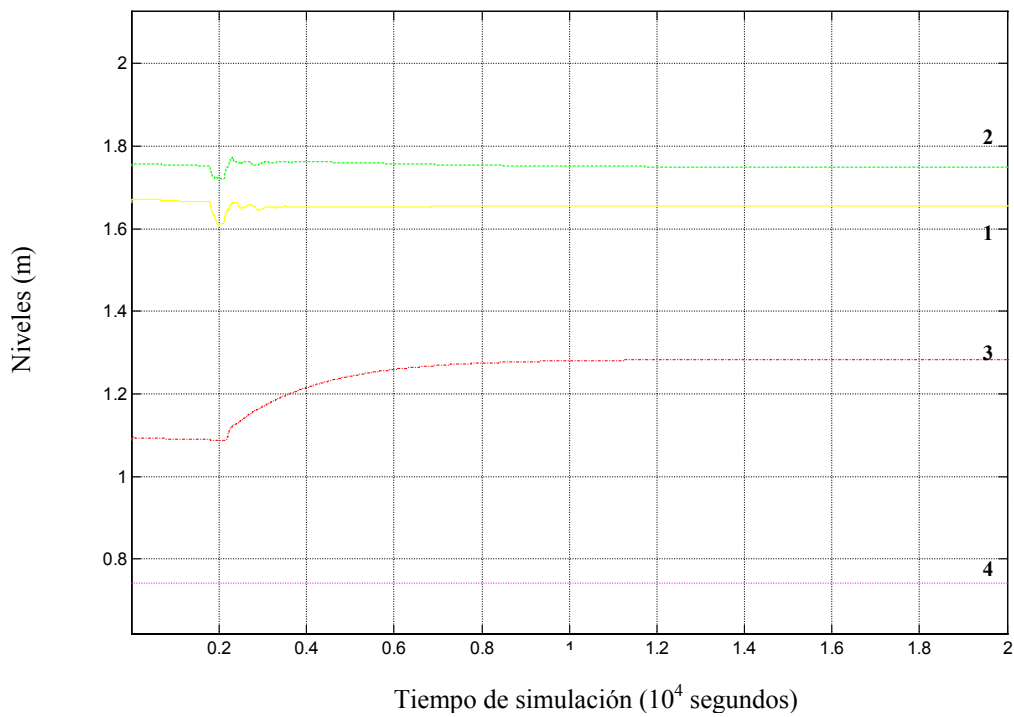


Figura 23. – Evolución de niveles (m) en el experimento 2 del canal 1  
Experimento HY1

### **Experimento 3 (MK2)**

En este experimento se simula una extracción de  $+1,4 \text{ m}^3/\text{s}$  en el segundo tramo de canal, en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Esta extracción se simula mediante un decremento de  $34,07 \text{ centímetros}$  en la cota del vertedero de dicho tramo, que pasa de un valor de  $1,196 \text{ metros}$  a  $0,855 \text{ metros}$ . Este experimento también permite analizar el efecto sobre los tramos de canal situados aguas arriba de dicho cambio.

El decremento de la pared del vertedero lateral provoca una disminución brusca del nivel en el segundo tramo. La respuesta lógica sería una abertura brusca de las compuertas 1 y 2 con el objetivo de aumentar el nivel en el segundo tramo. Sin embargo, como se muestra en la *Figura 24*, la respuesta inicial presenta unas oscilaciones muy importantes, creando unas oscilaciones de nivel en el primer tramo considerables (observar *Figura 25*). Este comportamiento inicial provoca una respuesta lenta del canal, consiguiéndose la convergencia en unos tiempos muy elevados.

La energía consumida por las compuertas es muy elevada. Las oscilaciones iniciales no llevan a ninguna parte, y conllevan un desperdicio energético considerable.

	<b>TC (seg)</b>	<b>EN (m)</b>	<b>MC (m)</b>
Tramo 1	13250	0,0057	1,1909
Tramo 2	9250	0,0010	0,7054
Tramo 3	0	0,0002	0,0782
Tramo 4	0	0,0000	0,0073
<b>Canal 1</b>	13250	0,0069	1,9818

*Tabla 12 – Indicadores de rendimiento del experimento 3 en el canal 1*

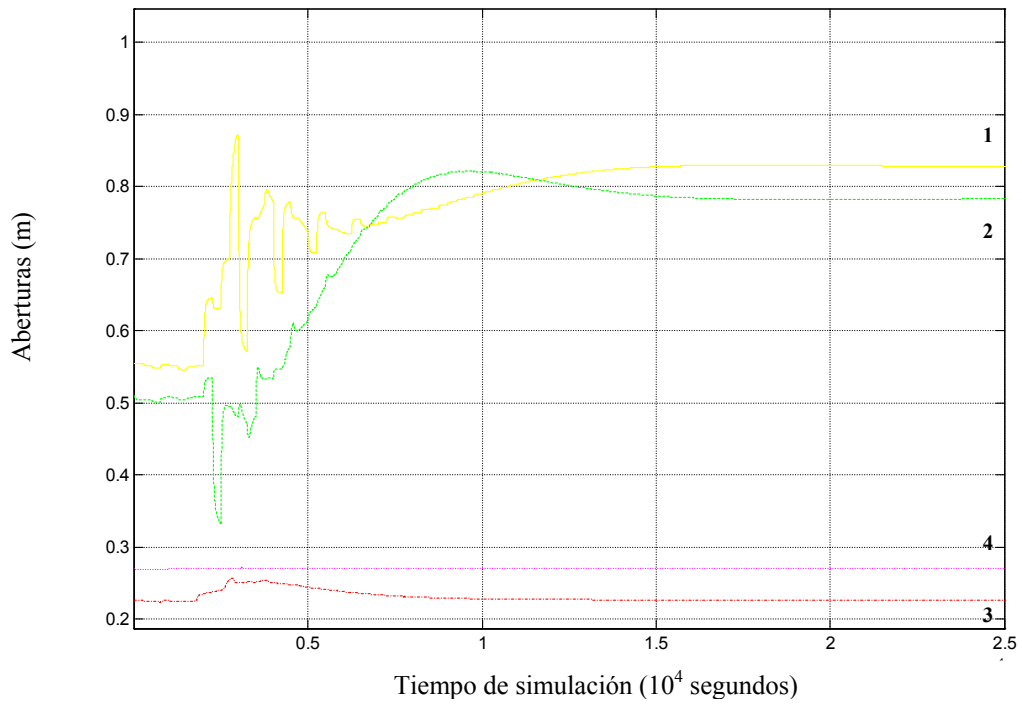


Figura 24. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 3 del canal 1  
Experimento MK2

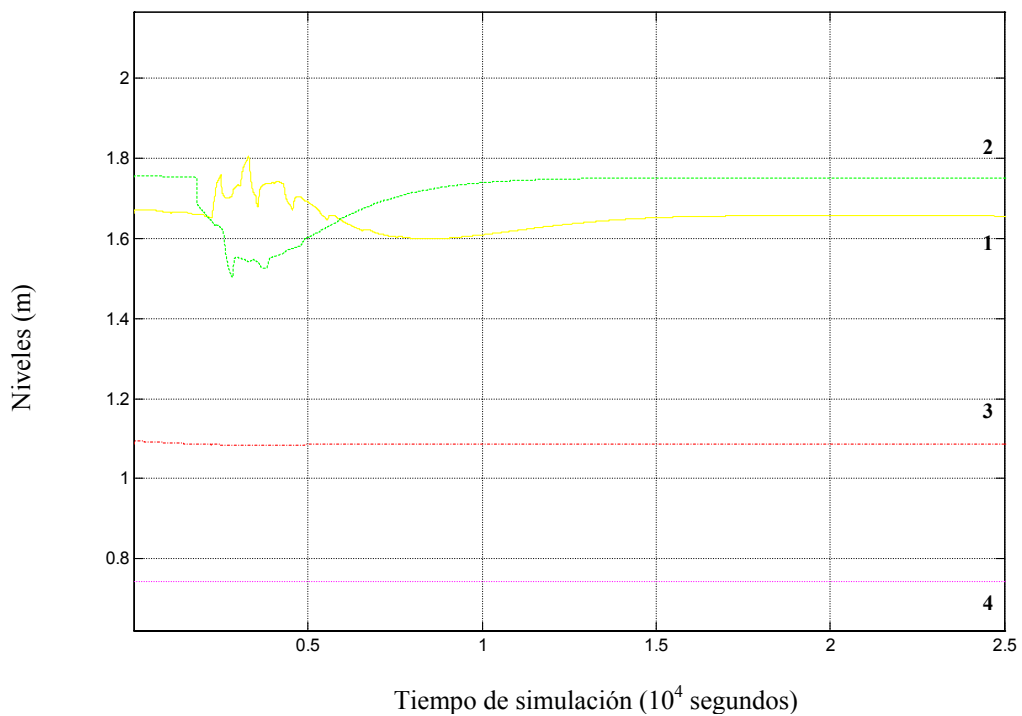


Figura 25. – Evolución de niveles (m) en el experimento 3 del canal 1  
Experimento MK2

### **Experimento 4 (HY2)**

En este experimento se simula una extracción de  $+1,4 \text{ m}^3/\text{s}$  en el segundo tramo de canal, en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Esta extracción se simula mediante un decremento de  $34,07 \text{ centímetros}$  en la cota del vertedero de dicho tramo, que pasa de un valor de  $1,196 \text{ metros}$  a  $0,855 \text{ metros}$ .

La respuesta del canal difiere en gran medida a la respuesta ofrecida en el experimento 3. La *Figura 26* muestra cómo las compuertas 1 y 2 responden a la perturbación presente aguas debajo de un modo mucho más eficiente. En la *zona de almacenamiento* del segundo tramo hay un déficit de agua, por lo que es necesario que el caudal aumente desde aguas arriba, por eso, las compuertas 1 y 2 se abren rápidamente.

Debido a la gran rapidez en la respuesta de las compuertas, observando la *Figura 26*, los niveles en los tramos primero y segundo no se ven muy afectados, y recuperan su valor de consigna con gran celeridad. Los tiempos de convergencia son mucho menores que en el experimento 3.

Con relación a la respuesta de las compuertas, el indicador de rendimiento MC muestra que el controlador de Hayami es más eficiente, ya que desperdicia menos energía que el controlador de Muskingum (experimento 3).

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	4500	0,0067	0,6113
Tramo 2	2300	0,0036	0,8453
Tramo 3	0	0,0025	0,0349
Tramo 4	0	0,0001	0,0044
<b>Canal 1</b>	4500	0,0129	1,4959

*Tabla 13 – Indicadores de rendimiento del experimento 4 en el canal 1*

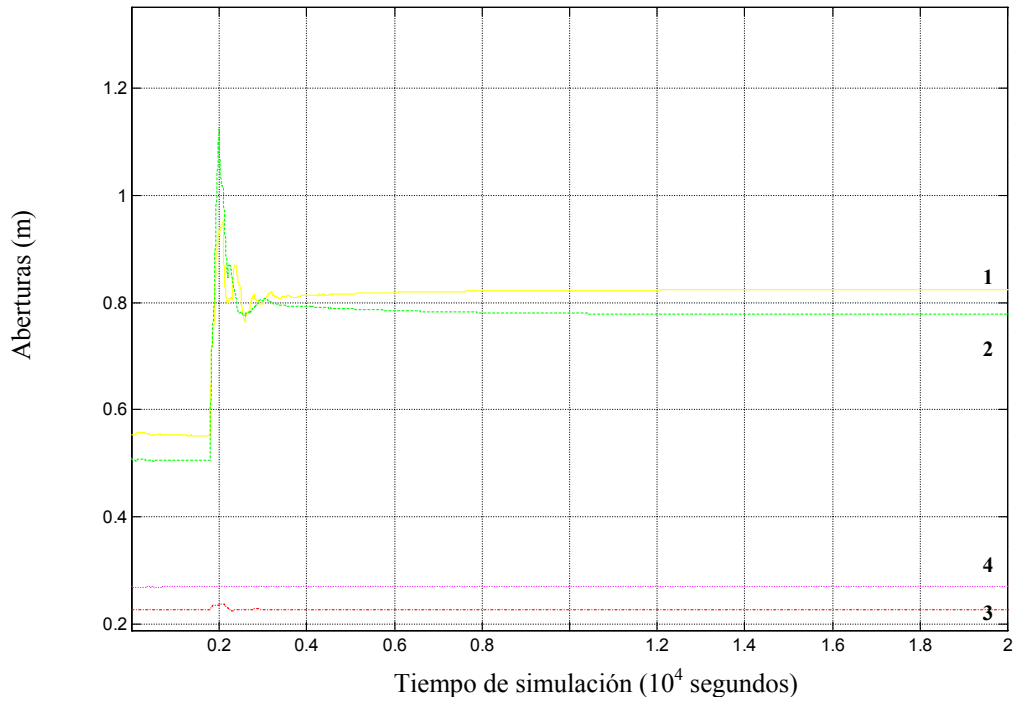


Figura 26. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 4 del canal 1  
Experimento HY2

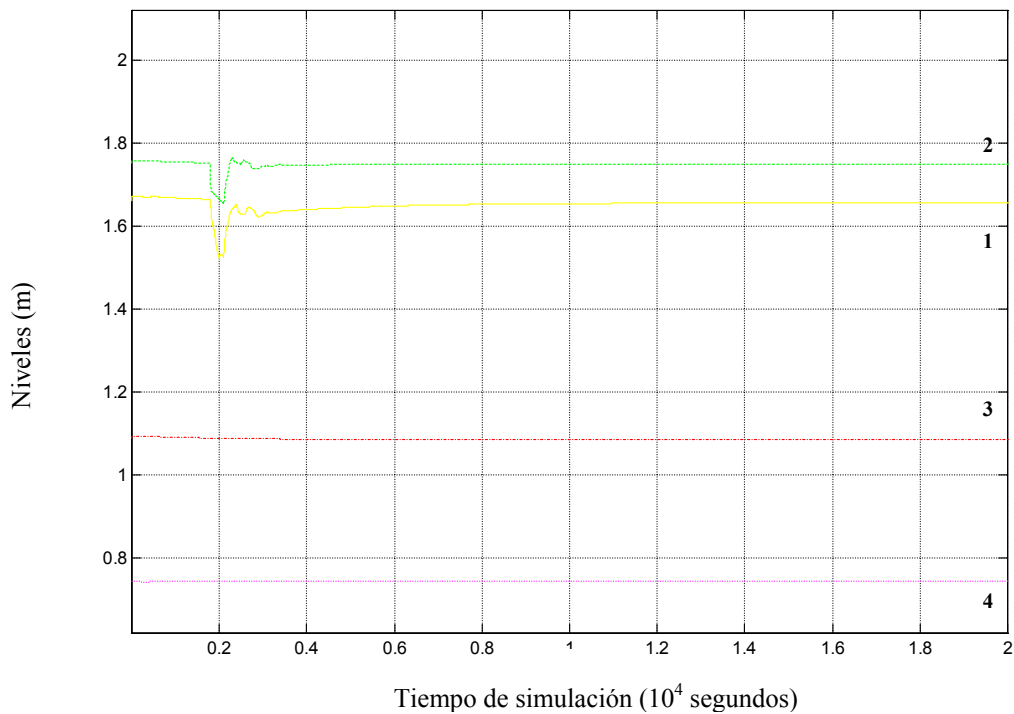


Figura 27. – Evolución de niveles (m) en el experimento 4 del canal 1  
Experimento HY2

### **Experimento 5 (MK3)**

En este experimento se simula dos extracciones de  $+1 \text{ m}^3/\text{s}$  en los tramos primero y tercero en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Estas extracciones se simulan mediante un decremento de las cotas de los vertederos laterales de 31,97 y 32,18 centímetros respectivamente, de modo que las cotas de los vertederos laterales pasan de 1,397 metros a 1,010 metros, y de 0,829 metros a 0,507 metros, respectivamente.

La respuesta global del sistema se puede calificar de lenta. La *Figura 28* muestra que las compuertas responden con unas oscilaciones exageradas. En especial, la compuerta 2, situada entre las dos perturbaciones, realiza un movimiento extremo, pasando de una abertura de unos 0,5 metros a una de 1,08 metros, para finalizar con un valor de 0,7. Primero abre compuertas para aumentar el caudal circulante y recuperar el nivel de consigna en el tercer tramo. Posteriormente, se cierra para retener agua, con objeto de recuperar el nivel en el primer tramo.

Este comportamiento oscilatorio de las compuertas provoca sendas oscilaciones en los niveles, principalmente en los tramos primero y segundo. Además, estas oscilaciones comportan un consumo innecesario de energía muy elevado.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	9250	0,0034	1,0350
Tramo 2	10000	0,0016	1,9191
Tramo 3	8750	0,0002	0,1823
Tramo 4	0	0,0000	0,1891
<b>Canal 1</b>	10000	0,0052	3,3255

*Tabla 14 – Indicadores de rendimiento del experimento 5 en el canal 1*

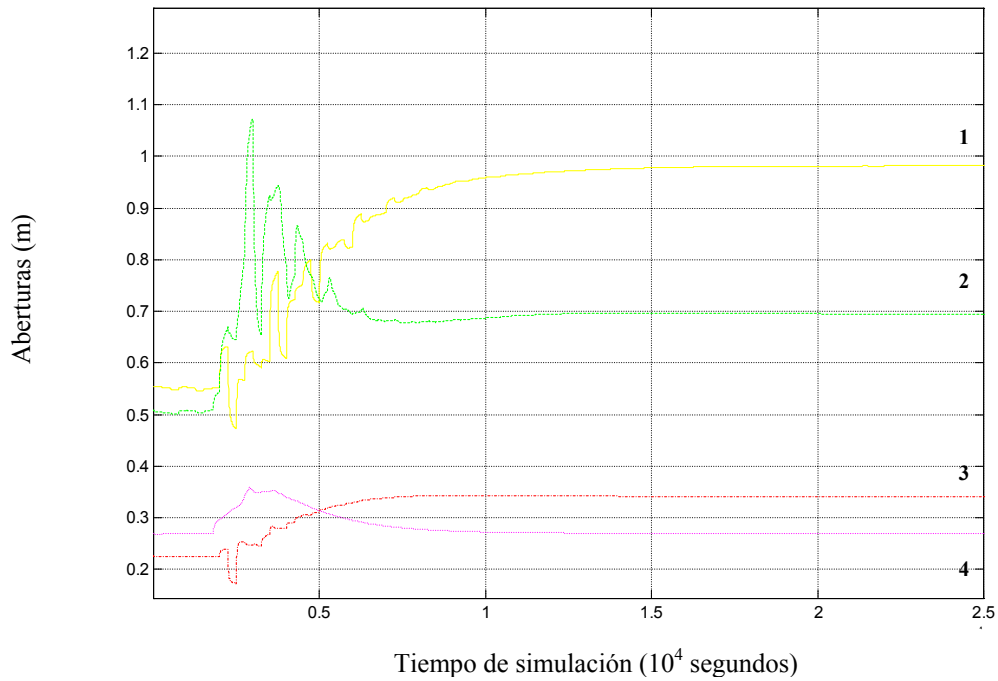


Figura 28. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 5 del canal 1  
Experimento MK3

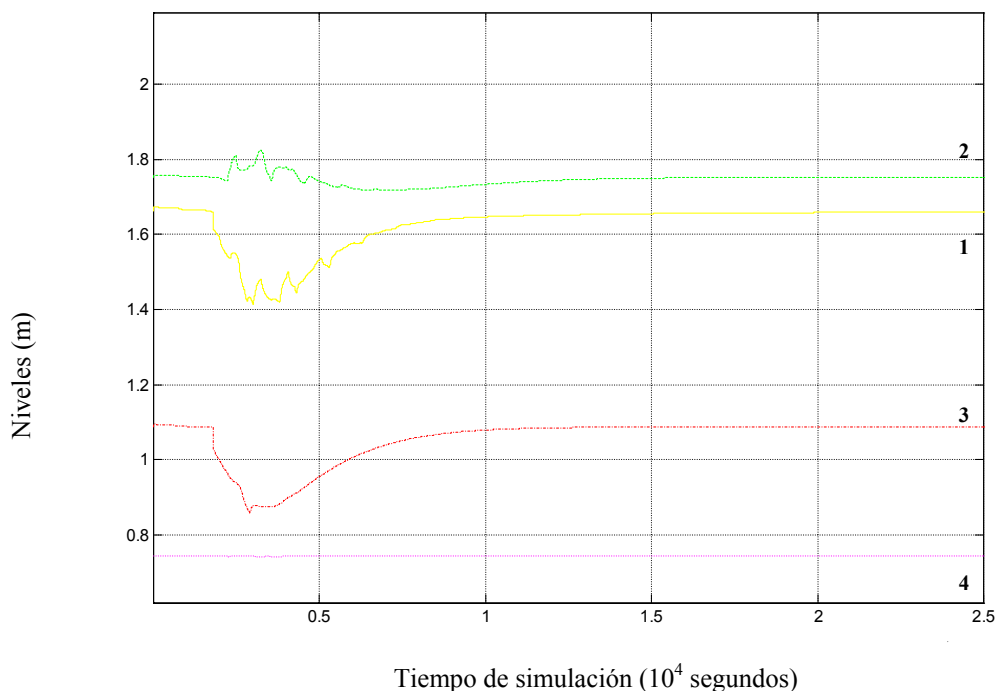


Figura 29. – Evolución de niveles (m) en el experimento 5 del canal 1  
Experimento MK3



### **Experimento 6 (HY3)**

En este experimento se simula dos extracciones de  $+1 \text{ m}^3/\text{s}$  en los tramos primero y tercero en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Estas extracciones se simulan mediante un decremento de las cotas de los vertederos laterales de 31,97 y 32,18 centímetros respectivamente, de modo que las cotas de los vertederos laterales pasan de 1,397 metros a 1,010 metros, y de 0,829 metros a 0,507 metros, respectivamente.

La respuesta ofrecida por el controlador de Hayami difiere en gran medida de la respuesta del controlador de Muskingum (experimento 5). En líneas generales, las tendencias en los movimientos de compuertas son similares, pero estos se producen en un menor tiempo. La respuesta de las compuertas es mucho más rápida, de tal manera que el aumento del caudal circulante es casi instantáneo, limitado únicamente por la dinámica del propio canal. Esta rapidez en la respuesta de las compuertas conlleva una rápida recuperación de los niveles en los tres tramos afectados (observar *Figura 31*).

Se puede observar que la evolución del nivel en el segundo tramo difiere bastante del experimento 5. Mediante el controlador de Hayami, el canal trabaja de un modo más global, el tramo segundo presenta una disminución en su nivel, que no se da en el experimento 5, pero que como contrapartida permite reducir la reducción de nivel en los tramos primero y segundo.

Los tiempos de convergencia son extremadamente inferiores respecto a los del experimento 5 (observar indicador TC), y la energía invertida en los movimientos de compuertas en el experimento 6 representa del orden de la mitad de la energía consumida en el experimento 5

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	3900	0.0042	0.5862
Tramo 2	2200	0.0038	0.9100
Tramo 3	3900	0.0021	0.1746
Tramo 4	0	0.0000	0.0742
<b>Canal 1</b>	3900	0.0101	1.7450

*Tabla 15 – Indicadores de rendimiento del experimento 6 en el canal 1*

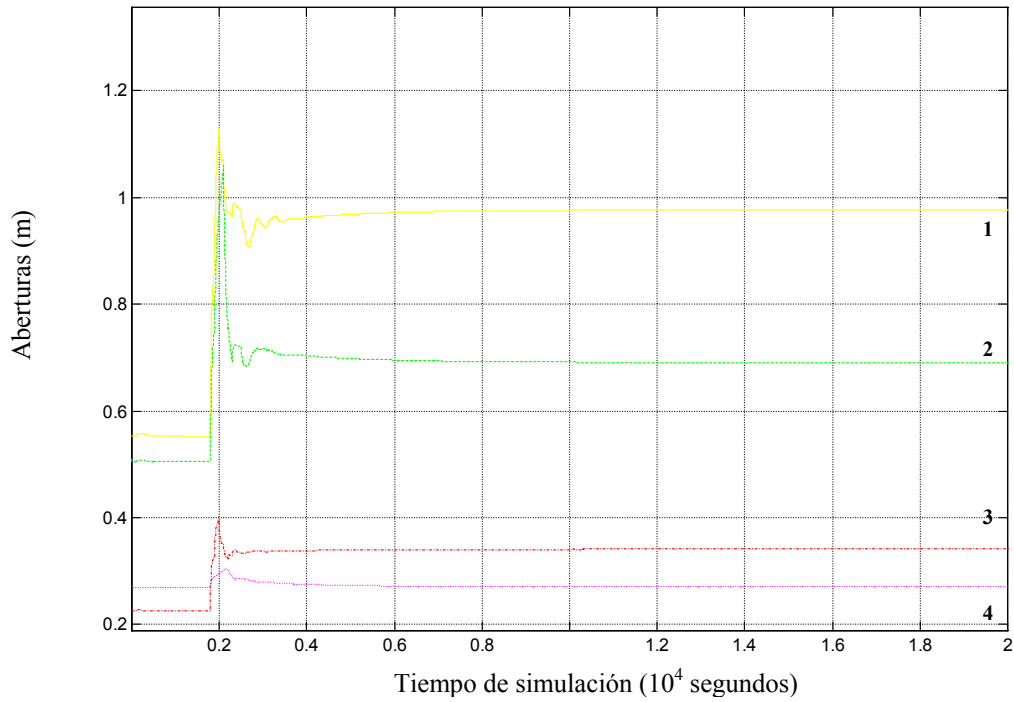


Figura 30. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 6 del canal 1  
Experimento HY3

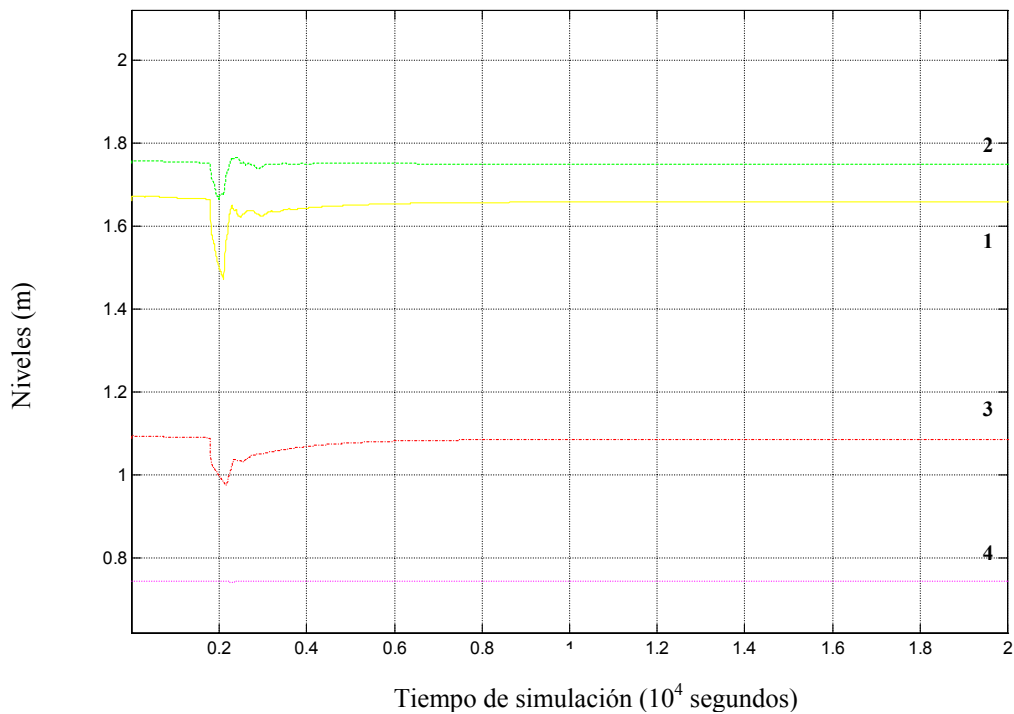


Figura 31. – Evolución de niveles (m) en el experimento 6 del canal 1  
Experimento HY3



### 5.3.2 – CANAL 2: CANAL DE OCHO TRAMOS DESIGUALES

El canal 2 es un canal de 19500 metros de longitud, dividido en ocho tramos desiguales, siendo los dos primeros de 2000 metros, el tercero de 5000 metros, el cuarto y el quinto de 3000 metros, y el sexto, séptimo y octavo de 1500 metros.

Las condiciones iniciales y condiciones de contorno de este canal quedan reflejadas en el siguiente gráfico:

Condiciones iniciales	Y(m)	Q <sub>c</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Tramo 1	1,936	5,83
Tramo 2	1,812	5,45
Tramo 3	1,695	4,82
Tramo 4	1,584	4,27
Tramo 5	1,445	3,91
Tramo 6	1,338	3,48
Tramo 7	1,198	2,88
Tramo 8	0,698	2,49

Condiciones de contorno		
Aguas arriba: Nivel del embalse (m)		2,000
Aguas abajo: Altura del vertedero (m)		0,212

Tabla 16 – Condiciones iniciales y condiciones de contorno en el canal 2

Los parámetros utilizados en cada controlador son:

Parámetros	Muskingum		Hayami	
	Periodo de muestreo	$\lambda$	Periodo de muestreo	$\lambda$
1500	250 segundos	6	100 segundos	20
2000	350 segundos	6	100 segundos	25
3000	500 segundos	6	100 segundos	40
5000	850 segundos	6	100 segundos	65

Tabla 17 – Parámetros utilizados por cada controlador en el canal 2

### **Experimento 1 (MK4)**

En este experimento se simula un cambio de consigna en el quinto tramo en el instante  $t = 0,5$  horas = 1800 segundos. El cambio de consigna consiste en un incremento de 20 centímetros, de modo que el nivel en el quinto tramo ha de pasar de un valor de 1,445 metros a 1,645 metros. Este experimento permite analizar el efecto sobre los tramos de canal situados aguas arriba de dicho cambio.

La *Figura 32* muestra que las compuertas situadas aguas arriba del tramo quinto, compuertas 1,2,3,4 y 5 aumentan sus aberturas para aumentar el caudal circulante, de modo que el nivel en el tramo quinto pueda alcanzar su nueva consigna. Como el caudal circulante ha aumentado, la compuerta 6 se cierra para mantener el caudal circulante aguas debajo de ella constante, y así mantener los niveles en los tramos sexto, séptimo y octavo.

Las compuertas 1,2,3 y 4 presentan unas oscilaciones considerables, que se reflejan en la evolución de los niveles. Estas oscilaciones en los niveles son mayores hacia aguas arriba, sobretodo en los tramos primero y segundo.

La mayor oscilación de las compuertas 1 y 2 se corresponde con un mayor consumo de energía (observar valores de MC para tramos 1 y 2 ).

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	12600	0,0048	0,9084
Tramo 2	17150	0,0035	0,5605
Tramo 3	27200	0,0152	0,1501
Tramo 4	17500	0,0064	0,1595
Tramo 5	12500	0,0026	0,0923
Tramo 6	0	0,0016	0,0248
Tramo 7	0	0,0001	0,0171
Tramo 8	0	0,0000	0,0066
<b>Canal 2</b>	27200	0,0342	1,9193

*Tabla 18 – Indicadores de rendimiento del experimento 1 en el canal 2*

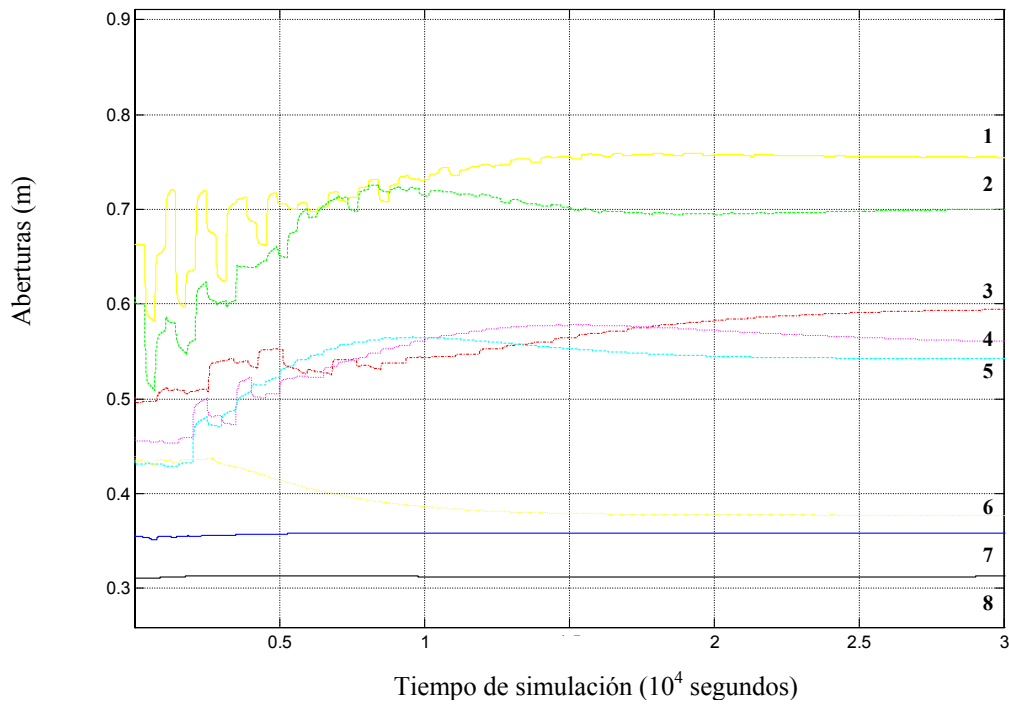


Figura 32. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 1 del canal 2  
Experimento MK4

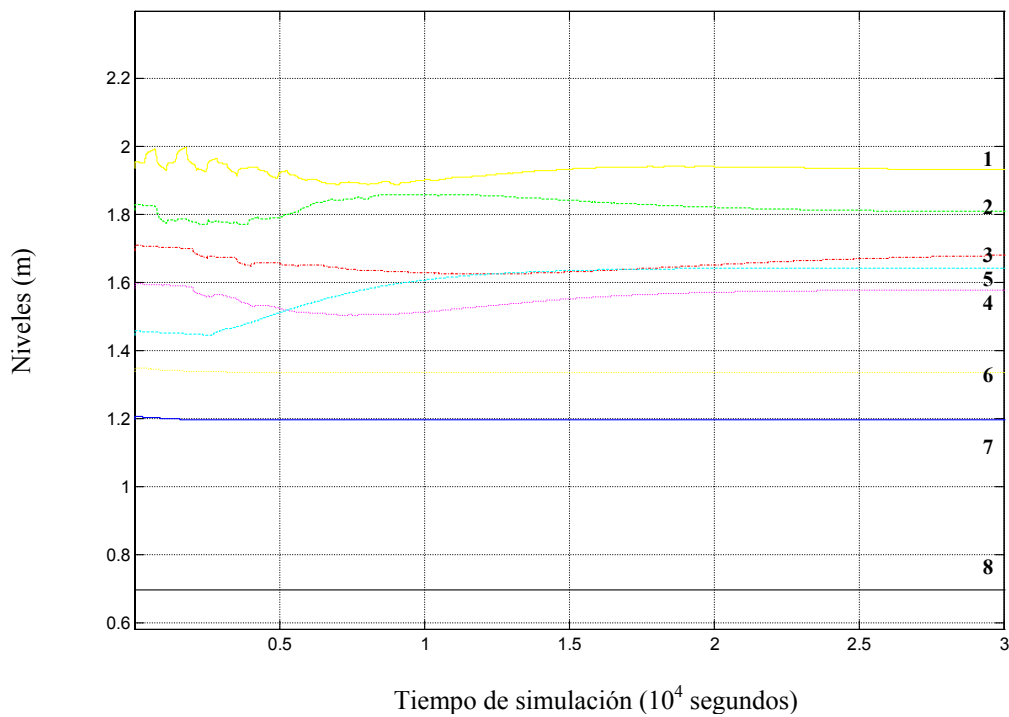


Figura 33. – Evolución de niveles (m) en el experimento 1 del canal 2  
Experimento MK4

### **Experimento 2 (HY4)**

En este experimento se simula un cambio de consigna en el quinto tramo en el instante  $t = 0,5$  horas = 1800 segundos. El cambio de consigna consiste en un incremento de 20 centímetros, de modo que el nivel en el quinto tramo ha de pasar de un valor de 1,445 metros a 1,645 metros.

Como también ocurría en el caso del canal 1, la respuesta de las compuertas en el modelo de Hayami es mucho más rápida, enérgica y eficiente. Las compuertas situadas aguas arriba del tramo quinto se abren rápidamente para aumentar el caudal circulante por el canal (observar *Figura 34*).

Si se observa los tiempos de convergencia de los tramos primero y segundo, y la evolución de sus niveles, se puede decir que estos no se ven muy afectados por el cambio de consigna en el tramo quinto.

La respuesta del tercer tramo (tramo de mayor longitud, 5000 metros) es mucho más eficiente que en el experimento 1; el tiempo de convergencia es de 14500 segundos, frente a 27200 segundos.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	2300	0,0080	0,3208
Tramo 2	2400	0,0035	0,3274
Tramo 3	14500	0,0097	0,2361
Tramo 4	4700	0,0059	0,2445
Tramo 5	11600	0,0057	0,0570
Tramo 6	0	0,0030	0,0132
Tramo 7	0	0,0026	0,0105
Tramo 8	0	0,0000	0,0048
<b>Canal 2</b>	14500	0,0384	1,2143

*Tabla 19 – Indicadores de rendimiento del experimento 2 en el canal 2*

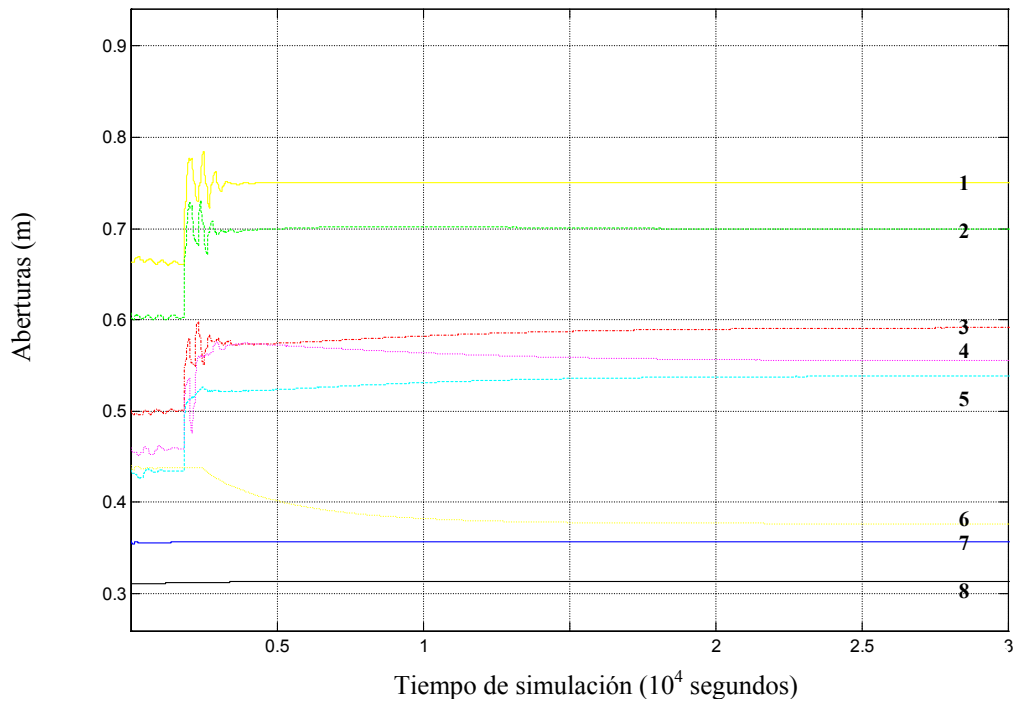


Figura 34. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 2 del canal 2  
Experimento HY4

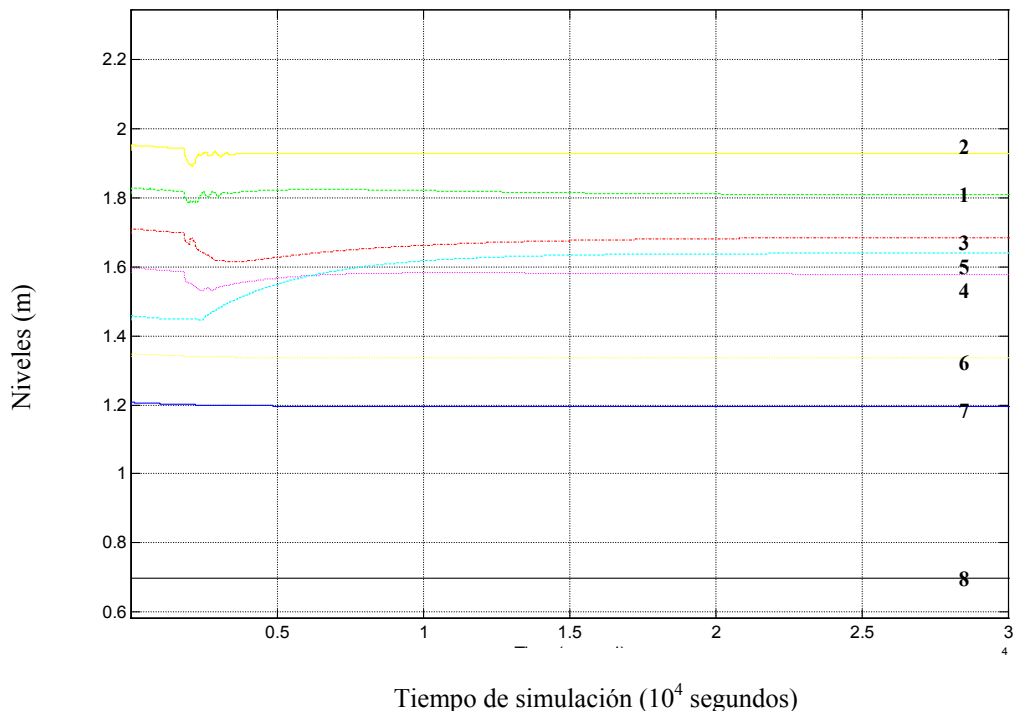


Figura 35. – Evolución de niveles (m) en el experimento 2 del canal 2  
Experimento HY4



### **Experimento 3 (MK5)**

En este experimento se simula una extracción de  $+0,4 \text{ m}^3/\text{s}$  en el cuarto tramo de canal, en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Esta extracción se simula mediante un decremento de 14,98 centímetros en la cota del vertedero de dicho tramo, que pasa de un valor de 1,339 metros a 1,189 metros.

La disminución brusca de la cota del vertedero lateral en el tramo cuarto provoca una disminución brusca del nivel en el mismo tramo. La respuesta de las compuertas situadas aguas arriba, como se puede observar en la *Figura 36*, es abrirse de modo que el caudal circulante aumente, y el nivel de consigna en el cuarto tramo se recupere.

La disminución del nivel en el cuarto tramo provoca también que el caudal circulante bajo la quinta compuerta disminuya, de modo que esta se abre para mantener el caudal circulante, y por consiguiente, el nivel aguas abajo.

La respuesta de las compuertas vuelve a ser bastante caótica, presentando fuertes oscilaciones.

Debido a que la respuesta de las compuertas no es suficientemente rápida, los niveles se recuperan lentamente.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	11900	0,0057	1,2186
Tramo 2	14700	0,0045	0,7927
Tramo 3	24650	0,0121	0,3230
Tramo 4	14000	0,0039	0,1669
Tramo 5	0	0,0034	0,0937
Tramo 6	0	0,0017	0,0319
Tramo 7	0	0,0001	0,0174
Tramo 8	0	0,0000	0,0066
<b>Canal 2</b>	24650	0,0314	2,6508

*Tabla 20– Indicadores de rendimiento del experimento 3 en el canal 2*

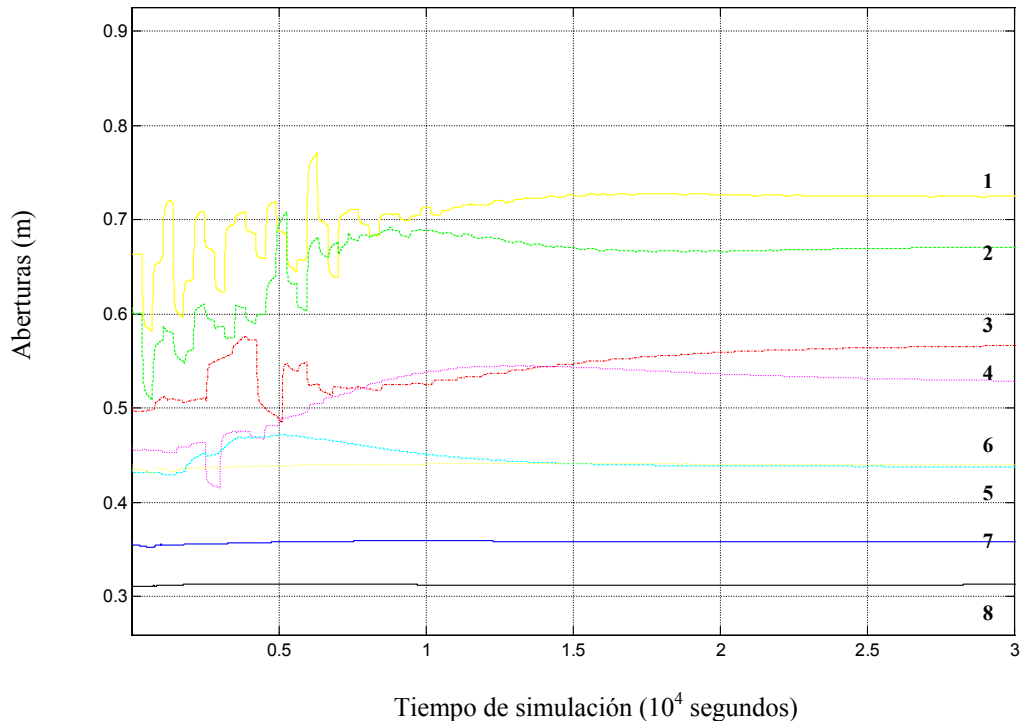


Figura 36. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 3 del canal 2  
Experimento MK5

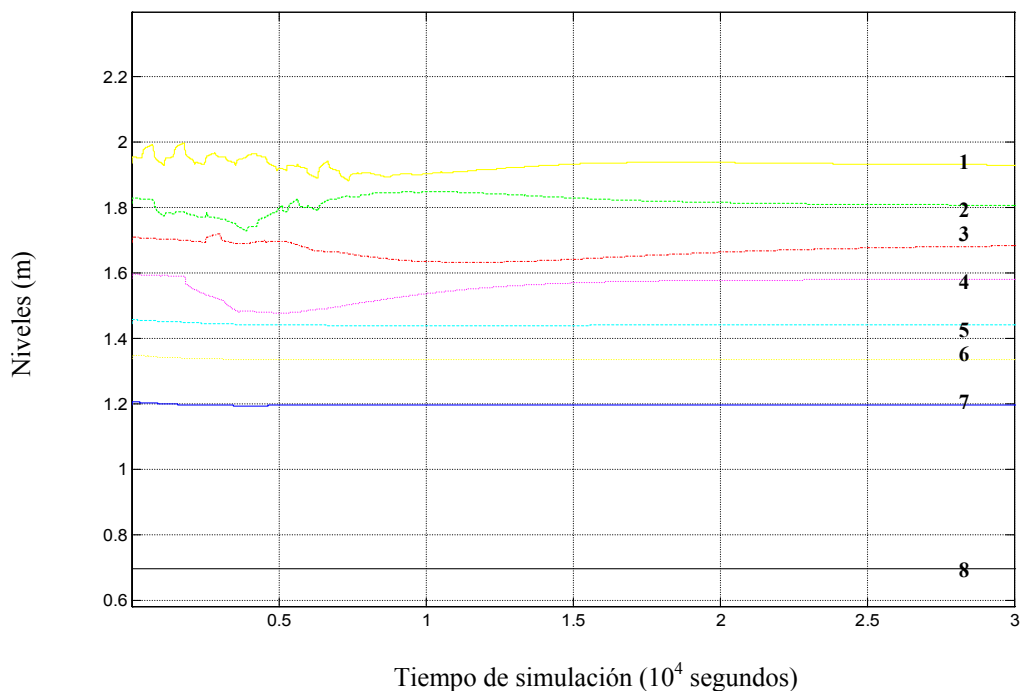


Figura 37. – Evolución de niveles (m) en el experimento 3 del canal 2  
Experimento MK5

### **Experimento 4 (HY5)**

En este experimento se simula una extracción de  $+0,4 \text{ m}^3/\text{s}$  en el cuarto tramo de canal, en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Esta extracción se simula mediante un decremento de 14,98 centímetros en la cota del vertedero de dicho tramo, que pasa de un valor de 1,339 metros a 1,189 metros.

El controlador de Hayami sigue marcando una tendencia muy clara, destacándose respecto al modelo de Muskingum. Su respuesta es mucho más veloz, permitiendo que los niveles se recuperen mucho antes, como se puede observar en la *Figura 39*, y las oscilaciones que presenta son claramente despreciables frente a las generadas por Muskingum.

Con relación al tiempo de convergencia, si se toman los cuatro tramos superiores (tramos afectados por la perturbación), el tramo que tarda más en converger, usando Hayami, es el tercer tramo, que presenta un TC de 11900 segundos. En ese mismo instante, usando el modelo de Muskingum, es cuando converge el primer tramo, siendo el primero de los cuatro en converger ( el último es el tercer tramo que converge a los 24650 segundos).

El indicador de energía de control MC, también demuestra que Hayami es muy superior a Muskingum. El MC de todo el canal en un caso es de 0,9489 metros, frente a los 2,6508 del otro.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	2200	0,0079	0,2423
Tramo 2	2100	0,0037	0,2444
Tramo 3	11900	0,0094	0,1810
Tramo 4	6700	0,0057	0,1878
Tramo 5	0	0,0048	0,0615
Tramo 6	0	0,0032	0,0166
Tramo 7	0	0,0027	0,0105
Tramo 8	0	0,0000	0,0048
<b>Canal 2</b>	11900	0,0374	0,9489

*Tabla 21 – Indicadores de rendimiento del experimento 4 en el canal 2*

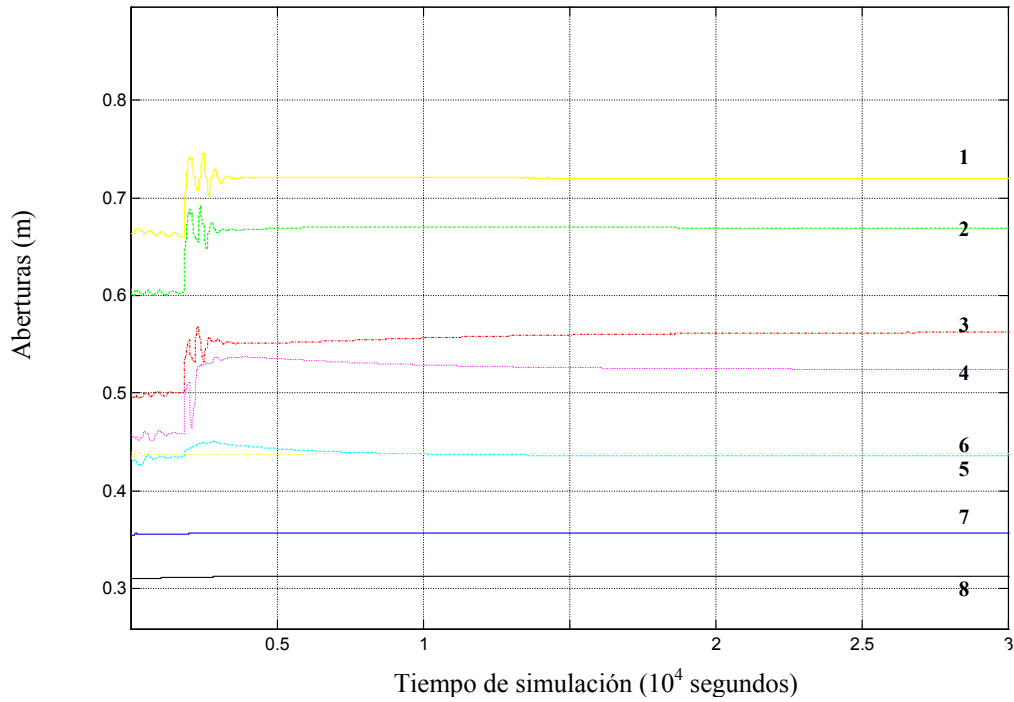


Figura 38. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 4 del canal 2  
Experimento HY5

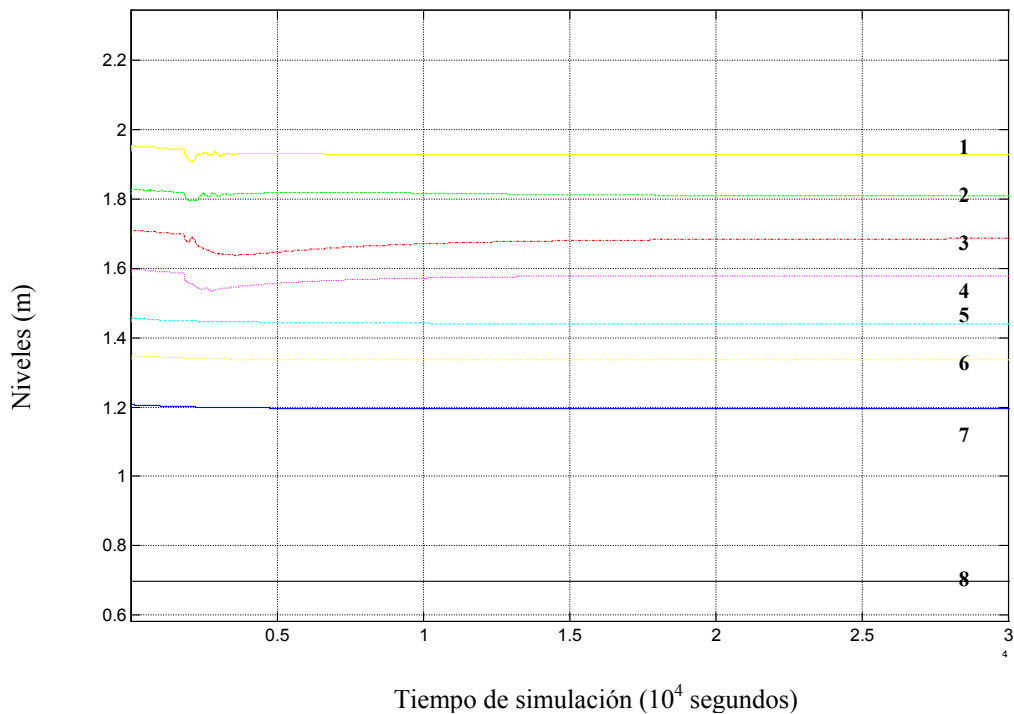


Figura 39. – Evolución de niveles (m) en el experimento 4 del canal 2  
Experimento HY5

### **Experimento 5 (MK6)**

En este experimento se simula una extracción de  $+1 \text{ m}^3/\text{s}$  en el tercer tramo de canal, una inyección de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  en el quinto tramo y una extracción de  $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$  en el séptimo tramo, en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Estas extracciones e inyección se simulan mediante un decremento de 30,64 centímetros, un incremento de 8,91 centímetros y un decremento de 25,57 centímetros, respectivamente en las cotas de los vertederos correspondientes. Las cotas de los tres vertederos pasan de un valor de 1,387 metros a 1,081 metros, de 1,192 metros a 1,281 metros y de 0,952 metros a 0,696 metros, respectivamente.

La respuesta de las compuertas en este experimento se pueden clasificar como caóticas. La *Figura 40* muestra unas grandes oscilaciones extendidas durante un largo periodo de tiempo. Estas oscilaciones en las aberturas provocan sendas oscilaciones en los niveles.

El tercer tramo presenta en especial una respuesta extremadamente lenta. Su tiempo de convergencia es de 30000 segundos, el tiempo de simulación.

La tendencia de todas las compuertas es abrir para aumentar el caudal circulante, incluso la quinta compuerta, pesar de que aguas debajo de ella se produce una inyección de caudal que genera un aumento del nivel. Este fenómeno es debido a que esta inyección de caudal, debido a su bajo valor respecto a las extracciones, es una perturbación que favorece a la estabilización del sistema, de modo que el sistema no trabaja para corregirla, sino que la usa para corregir las otras perturbaciones.

	<b>TC (seg)</b>	<b>EN (m)</b>	<b>MC (m)</b>
Tramo 1	11900	0,0008	1,5196
Tramo 2	24150	0,0064	1,7304
Tramo 3	30000	0,0203	0,6455
Tramo 4	6500	0,0062	0,8847
Tramo 5	19000	0,0028	0,2795
Tramo 6	11000	0,0017	0,4432
Tramo 7	8500	0,0002	0,2461
Tramo 8	0	0,0000	0,1333
<b>Canal 2</b>	<b>30000</b>	<b>0,0384</b>	<b>5,8823</b>

*Tabla 22 – Indicadores de rendimiento del experimento 5 en el canal 2*

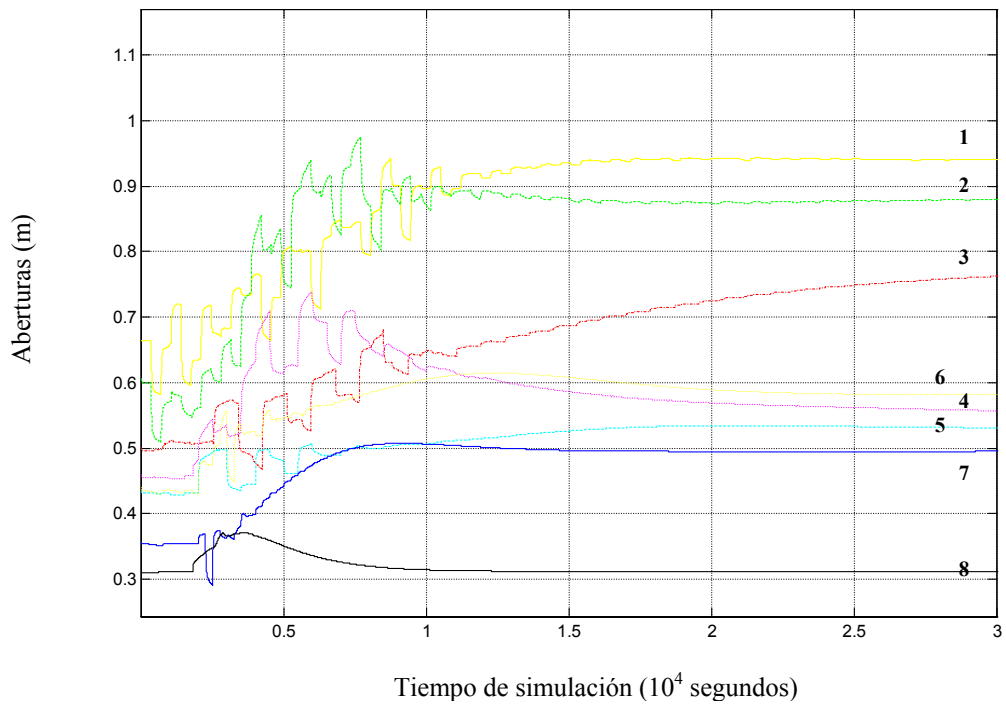


Figura 40. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 5 del canal 2  
Experimento MK6

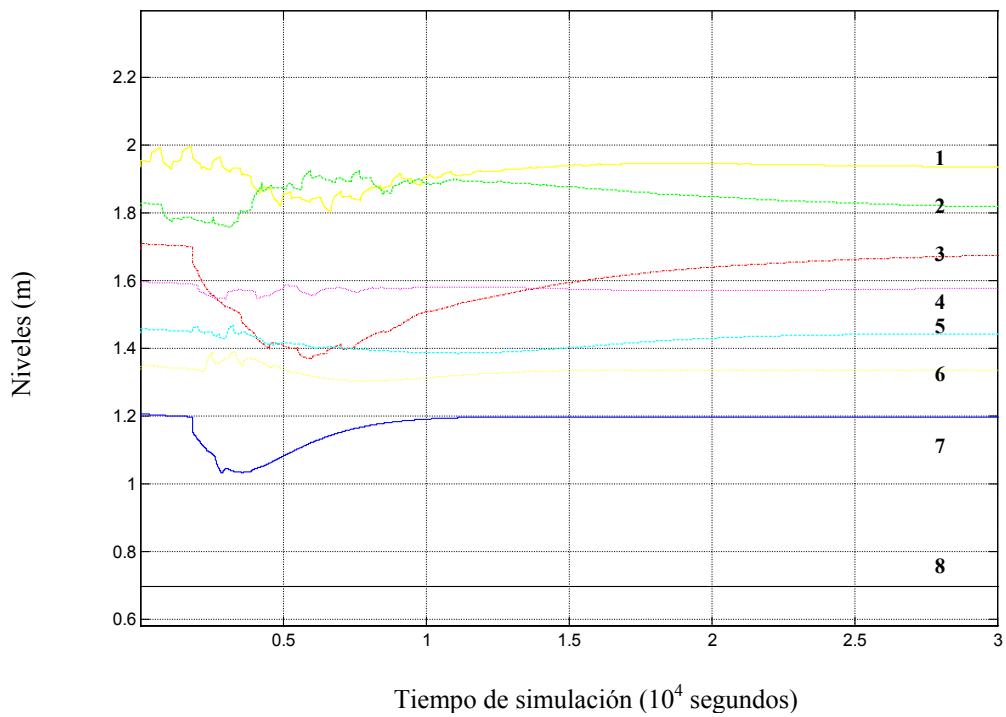


Figura 41. – Evolución de niveles (m) en el experimento 5 del canal 2  
Experimento MK6

### **Experimento 6 (HY6)**

En este experimento se simula una extracción de  $+1 \text{ m}^3/\text{s}$  en el tercer tramo de canal, una inyección de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  en el quinto tramo y una extracción de  $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$  en el séptimo tramo, en el instante  $t = 0,5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Estas extracciones e inyección se simulan mediante un decremento de 30,64 centímetros, un incremento de 8,91 centímetros y un decremento de 25,57 centímetros, respectivamente en las cotas de los vertederos correspondientes. Las cotas de los tres vertederos pasan de un valor de 1,387 metros a 1,081 metros, de 1,192 metros a 1,281 metros y de 0,952 metros a 0,696 metros, respectivamente.

La respuesta del canal presenta unos movimientos de compuertas con ciertas oscilaciones, pero nada comparables con las del experimento 5. La respuesta del canal es infinitamente más rápida, y las trayectorias de aberturas de compuertas son mucho más “limpias”(observar la *Figura 41*).

Es de destacar el distinto comportamiento presentado por el tramo dos en los dos experimentos. Mientras que en el experimento 5 parece que almacena agua para posteriormente dársela al tramo tercero, en el experimento 6, este comportamiento se produce de un modo más suavizado.

También llama la atención lo que ocurre en el tercer y en el séptimo tramo. En el experimento 5, con relación al experimento 6, los niveles en estos tramos se alejan mucho del valor de consigna, tanto en valor como en tiempo.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)
Tramo 1	4500	0,0077	0,9492
Tramo 2	12900	0,0030	1,0825
Tramo 3	15300	0,0059	0,7760
Tramo 4	7100	0,0060	1,1848
Tramo 5	10800	0,0063	0,5410
Tramo 6	3200	0,0031	0,3863
Tramo 7	3300	0,0024	0,2257
Tramo 8	0	0,0001	0,0529
<b>Canal 2</b>	15300	0,0345	5,1984

*Tabla 23 – Indicadores de rendimiento del experimento 6 en el canal 2*

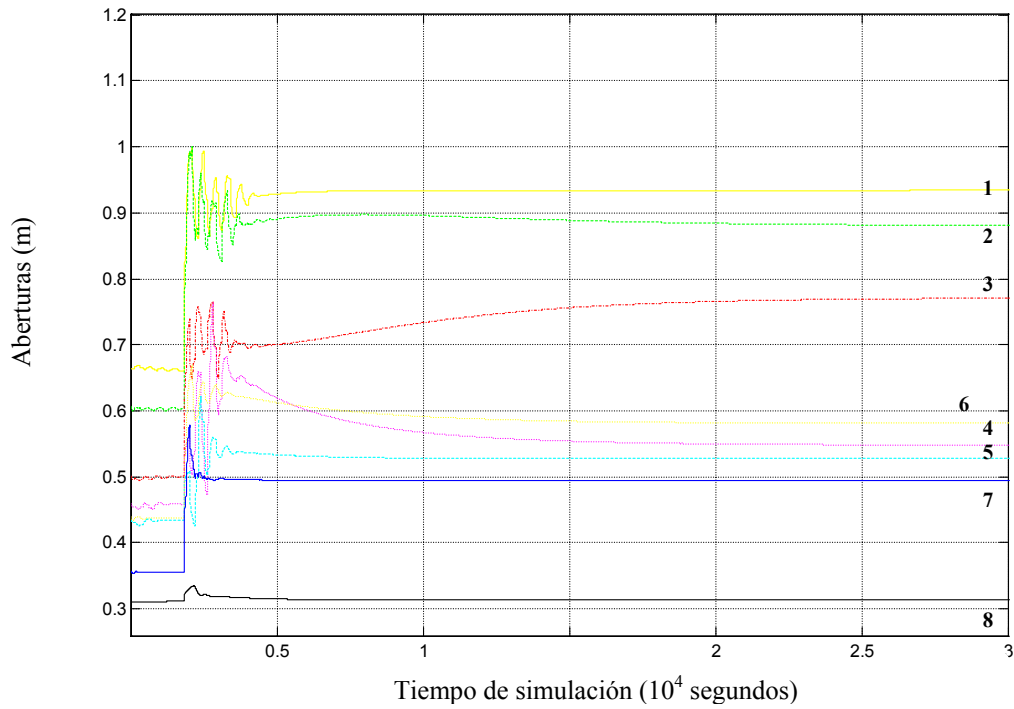


Figura 42. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 6 del canal 2  
Experimento HY6

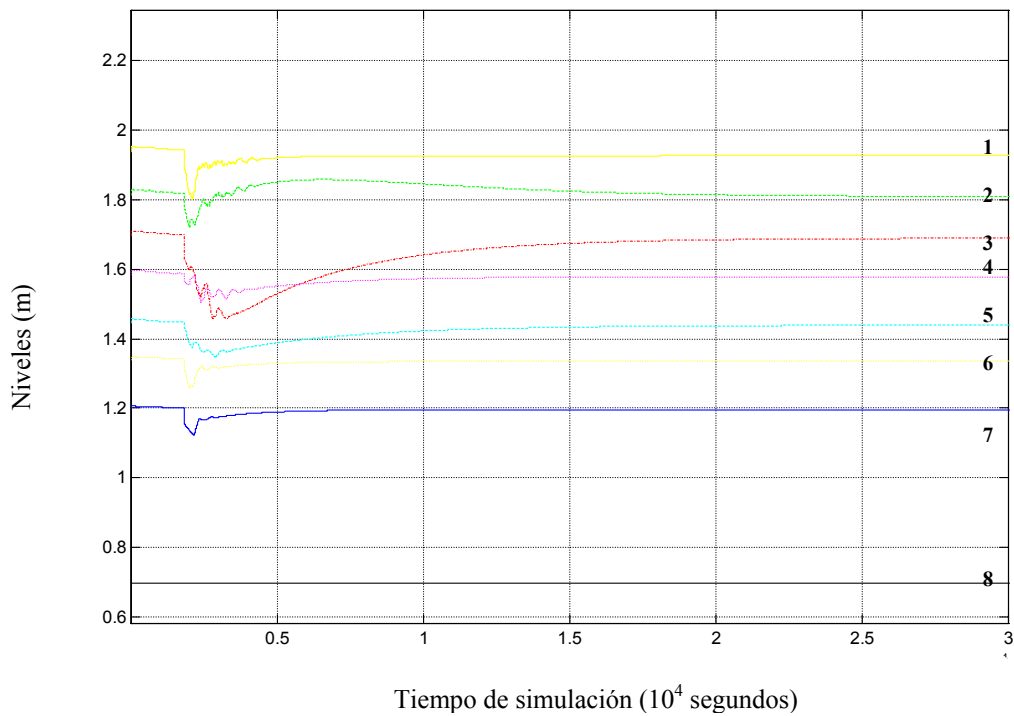


Figura 43. – Evolución de niveles (m) en el experimento 6 del canal 2  
Experimento HY6



## **5.4 – NUEVOS AJUSTES DE LOS CONTROLADORES**

Dados los resultados obtenidos, se plantea la cuestión de mejorar el rendimiento de ambos controladores. Para ello, se realizan una serie de cambios en los parámetros de los controladores, y se aplican dichos cambios únicamente al canal 1 (canal de cuatro tramos iguales).

Por un lado, el controlador basado en el modelo de Muskingum presenta una respuesta muy lenta en comparación al controlador basado en el modelo de Hayami. Una posible causa radicaría en el periodo de muestreo. El controlador basado en Muskingum entra en acción cada 250 segundos, mientras que el basado en Hayami lo hace cada 100. Se utiliza un periodo de muestreo de 250 segundos, porque en anteriores estudios realizados sobre este tipo de controlador (Vea, 1998; Fisac, 2001; Mantecón, 2003), se determinó que este era un valor óptimo, no obstante, en estos mismos estudios, se definió un posible rango de valores:

$$2\kappa\chi < T < \kappa \quad (5.7)$$

Dado que  $\chi = 0.2$  y  $\kappa = 300$ , la expresión (5.7) queda:  $120 < T < 300$  (5.8)

de modo que se usará un periodo de muestreo de 150 segundos en lugar de uno de 250. Para mantener el mismo horizonte de predicción, el valor de  $\lambda$  pasa entonces de un valor de 6 a uno de 10.

La siguiente tabla muestra los nuevos parámetros utilizados en las nuevas simulaciones:

<b>Parámetros</b>	<b>Muskingum</b>	<b>Hayami</b>
Periodo de muestreo	150 segundos	100 segundos
$\lambda$	10	20

*Tabla 24 – Parámetros utilizados por cada controlador en el canal 1*

En cuanto al controlador basado en el modelo de Hayami, se detecta una cierta brusquedad en su comportamiento. Por ello, se determina utilizar un limitador de incrementos de caudal, de modo que si el caudal calculado por el controlador predictivo excede en más de un 15% el caudal que circula bajo compuerta en el mismo instante de cálculo, se toma como incremento de caudal un 15 %.

Además de estos cambios en los controladores, también se quiere valorar tres nuevos indicadores de rendimiento propuestos en el artículo de Clemmens y Wahlin (2004). Se describen a continuación:

- MAE (Maximum absolute error). Mide la máxima desviación en cada tramo del canal respecto la consigna de nivel. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$MAE_i = \frac{\max(|y_i(t) - y_i^{sp}|)}{y_i^{sp}} \quad (5.9)$$

$$MAE = \max(MAE_i) \quad (5.10)$$

- IAE (Integral of the absolute magnitude of the error). Indica cuánto tiempo y cuan lejos el nivel del agua se ha desviado respecto al nivel de consigna. La siguiente ecuación permite su cálculo:

$$IAE_i = \frac{(\Delta t / t_s) \sum_{t=t_0}^{t_s} |y_i(t) - y_i^{sp}|}{y_i^{sp}} \quad (5.11)$$

$$IAE = \sum_{i=1}^N IAE_i \quad (5.12)$$

- IAQ (Integrated absolute discharge change). Es un indicador de la cantidad de movimientos de compuerta necesarios para conseguir el nivel de consigna. Su expresión es la siguiente:

$$IAQ_i = \sum_{t=t_0}^{t_s} (|Q_i(t) - Q_i(t-1)|) - |Q_i(t_0) - Q_i(t_s)| \quad (5.13)$$

$$IAQ = \sum_{i=1}^N IAQ_i \quad (5.14)$$

Este último indicador presenta una filosofía similar al indicador MC. El objetivo de ambos es contabilizar todos aquellos movimientos de compuerta innecesarios, que comportan una posible generación de frentes de onda y un gasto de energía inútil.

Los experimentos realizados en esta nueva fase de estudio se aplican al canal 1, canal de cuatro tramos iguales de 15000 metros cada uno, y son los siguientes:

- Experimento 1: Cambio de nivel en el tercer tramo utilizando el modelo de Muskingum. (MK1')
- Experimento 2: Cambio de nivel en el tercer tramo utilizando el modelo de Hayami. (HY1')
- Experimento 3: Perturbación en el segundo tramo utilizando el modelo de Muskingum. (MK2')
- Experimento 4: Perturbación en el segundo tramo utilizando el modelo de Hayami. (HY2')
- Experimento 5: Perturbación en los tramos primero y tercero utilizando el modelo de Muskingum. (MK3')
- Experimento 6: Perturbación en los tramos primero y tercero utilizando el modelo de Hayami. (HY3')

### ***Experimento 1 (MK1')***

En este experimento se simula un cambio de consigna en el tercer tramo en el instante  $t = 0,5$  horas = 1800 segundos. El cambio de consigna consiste en un incremento de 20 centímetros, de modo que el nivel en el tercer tramo ha de pasar de un valor de 1,088 metros a 1,288 metros.

Los cambios introducidos no mejoran el rendimiento del controlador, sino que provocan un aumento de la energía de control. Las oscilaciones en las aberturas de compuertas son mayores debido a que el controlador es llamado un mayor número de veces, mientras que el tiempo de convergencia y el error en el nivel al final de la simulación se mantienen constantes.

Si se observa la *Figura 44* y se compara con la *Figura 20*, las curvas de abertura de compuerta presentan una mayor brusquedad, la cual es indicativa del aumento detectado en la energía de control.

	<b>TC (seg)</b>	<b>EN (m)</b>	<b>MC (m)</b>	<b>MAE</b>	<b>IAE</b>	<b>IAQ (m3/s)</b>
Tramo 1	12000	0,0054	0,5536	0,0203	0,0070	3,2954
Tramo 2	9750	0,0028	0,3351	0,0401	0,0080	1,4029
Tramo 3	7000	0,0003	0,0433	0,1572	0,0145	0,2693
Tramo 4	0	0,0000	0,0081	0,0006	0,0001	0,0707
<b>Canal 1</b>	12000	0,0085	0,9401	0,1572	0,0296	5,0383

*Tabla 25 – Indicadores de rendimiento del experimento 1 en el canal 1*

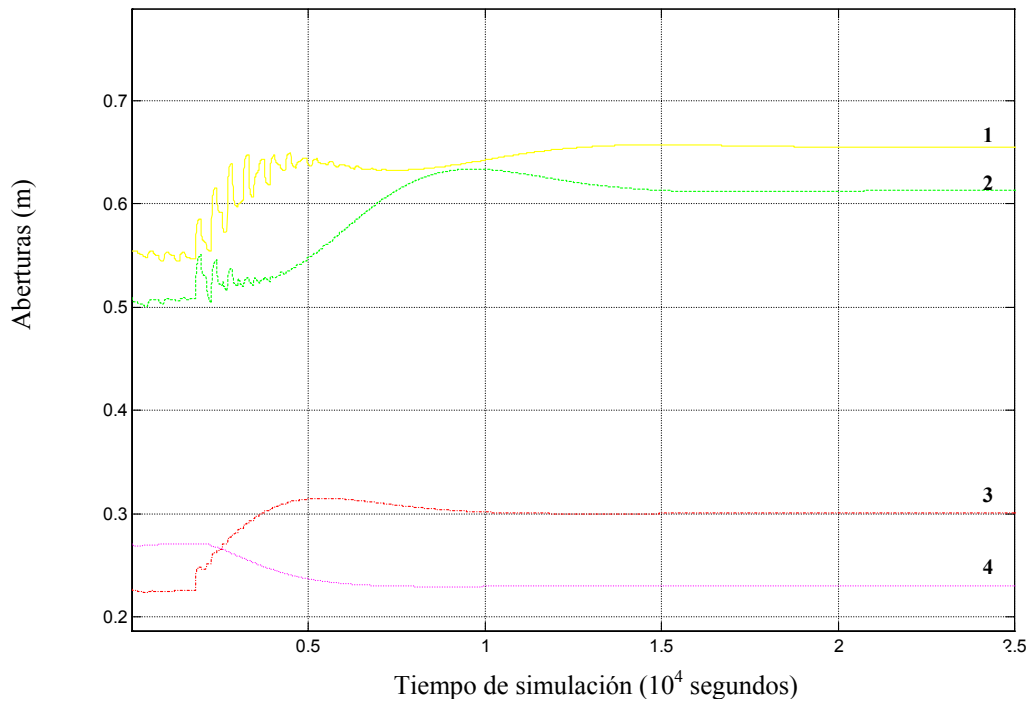


Figura 44. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 1 del canal 1  
Experimento MK1'

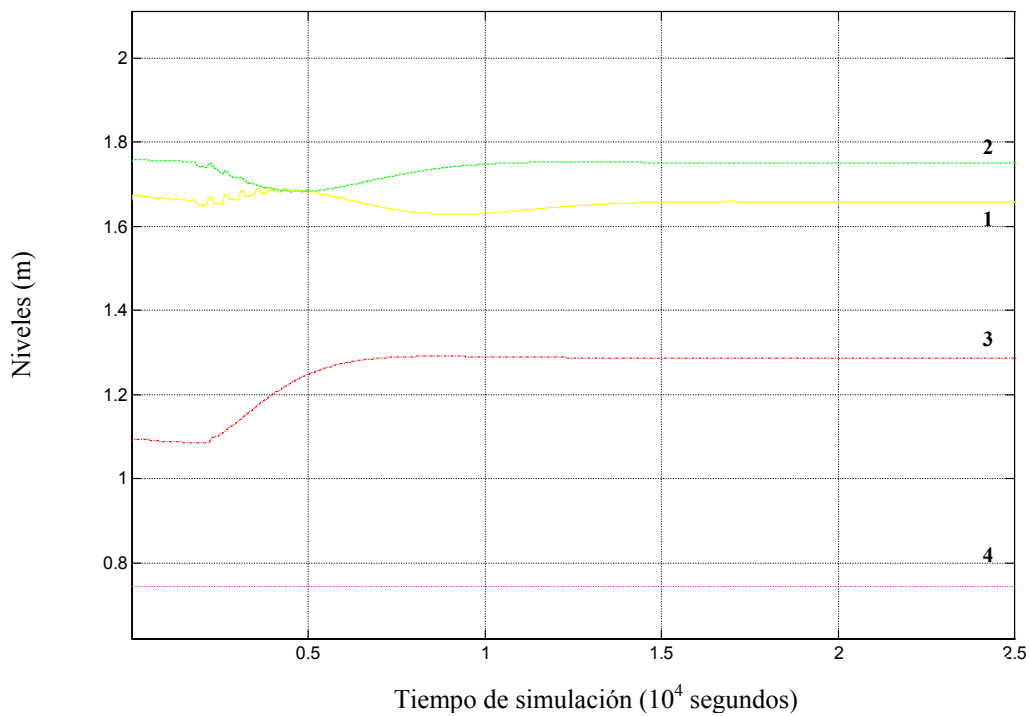


Figura 45. – Evolución de niveles (m) en el experimento 1 del canal 1  
Experimento MK1'

**Experimento 2 (HY1)**

En este experimento se simula un cambio de consigna en el tercer tramo en el instante  $t = 0,5$  horas = 1800 segundos. El cambio de consigna consiste en un incremento de 20 centímetros, de modo que el nivel en el tercer tramo ha de pasar de un valor de 1,088 metros a 1,288 metros.

El uso de un limitador en los incrementos de caudales bajo compuerta, permite reducir el comportamiento brusco de las compuertas, de modo que se desperdicia menos energía en los movimientos de compuerta. Este ahorro de energía se puede comprobar comparando los valores del indicador MC.

Los nuevos indicadores permiten reafirmar lo comentado anteriormente en el presente experimento y en el experimento 1. Los cambios introducidos únicamente influyen en la energía de control, reduciéndola en el caso del controlador de Hayami, y aumentándola en el caso del controlador de Muskingum.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)	MAE	IAE	IAQ (m3/s)
Tramo 1	2200	0,0070	0,2061	0,0314	0,0049	1,1749
Tramo 2	2200	0,0034	0,2142	0,0188	0,0023	0,8702
Tramo 3	6900	0,0042	0,0233	0,1546	0,0197	0,1628
Tramo 4	0	0,0001	0,0034	0,0004	0,0001	0,0678
<b>Canal 1</b>	6900	0,0147	0,4470	0,1546	0,0270	2,2757

*Tabla 26 – Indicadores de rendimiento del experimento 2 en el canal 1*

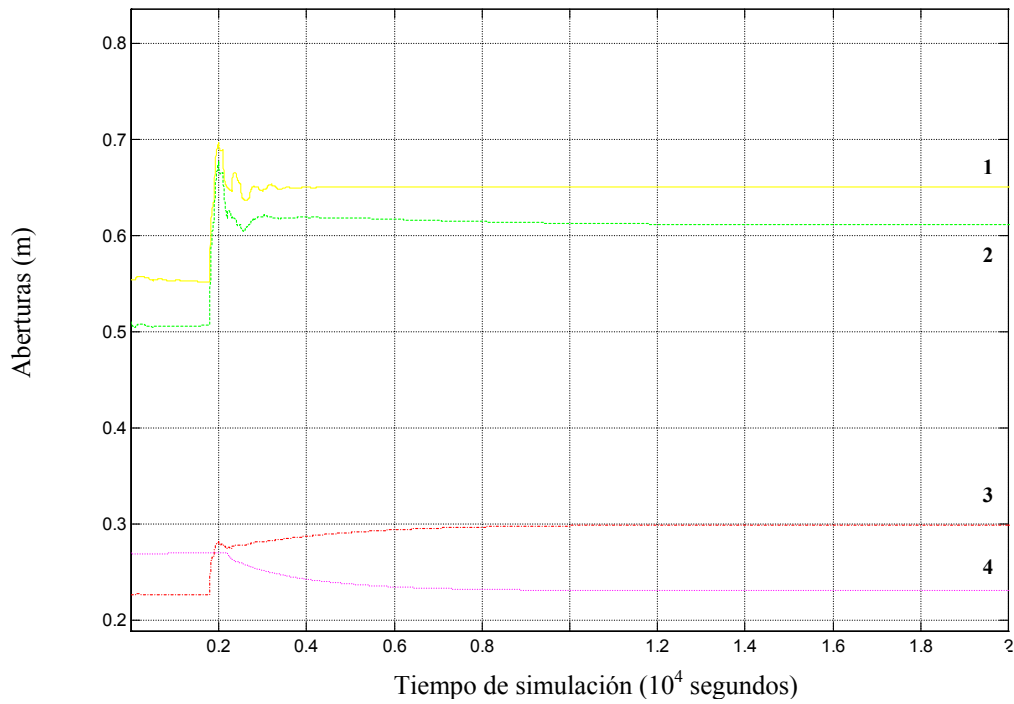


Figura 46. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 2 del canal 1  
Experimento HY1'

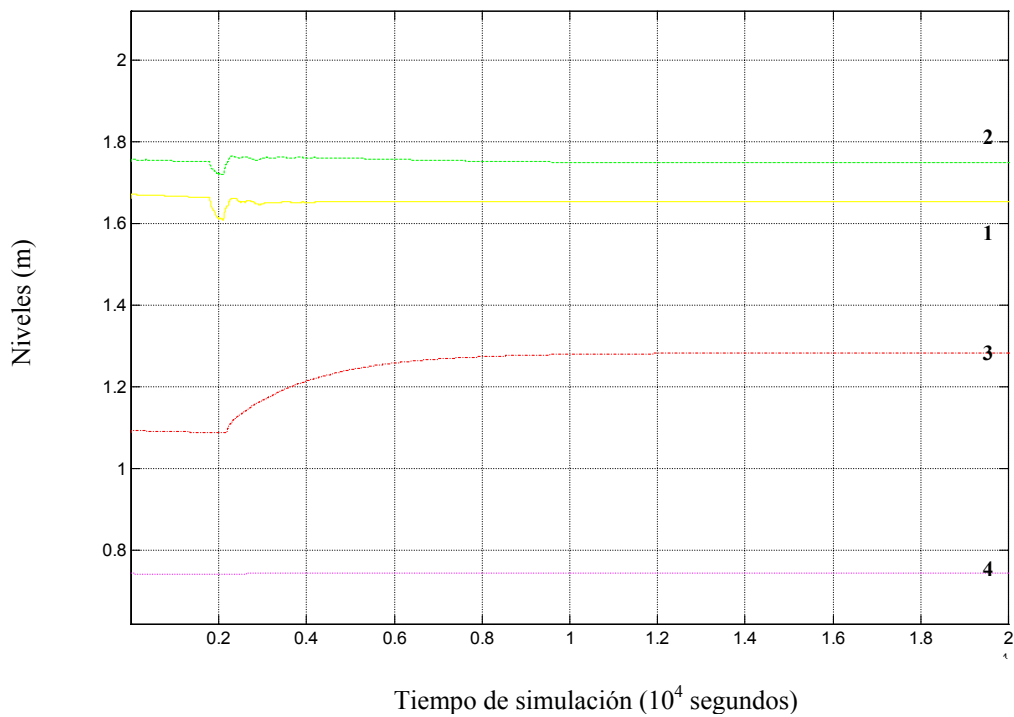


Figura 47. – Evolución de niveles (m) en el experimento 2 del canal 1  
Experimento HY1'

**Experimento 3 (MK2')**

En este experimento se simula una extracción de +1'4 m<sup>3</sup>/s en el segundo tramo de canal, en el instante t = 0'5 horas = 1800 segundos. Esta extracción se simula mediante un decremento de 34'07 centímetros en la cota del vertedero de dicho tramo, que pasa de un valor de 1'196 metros a 0'855 metros.

El uso de un tiempo de muestreo inferior, de 150 segundos , frente a uno de 250 segundos, permite reducir el tiempo de convergencia. Esta mejora tiene como contrapartida un aumento de la energía de control.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)	MAE	IAE	IAQ (m3/s)
Tramo 1	112500	0,0058	2,1171	0,0814	0,0143	11,5519
Tramo 2	7800	0,0011	0,9930	0,1190	0,0156	4,9736
Tramo 3	0	0,0003	0,0807	0,0060	0,0007	0,2677
Tramo 4	0	0,0000	0,0079	0,0004	0,0000	0,0441
<b>Canal 1</b>	112500	0,0072	3,1987	0,1190	0,0306	16,8373

*Tabla 27 – Indicadores de rendimiento del experimento 3 en el canal 1*

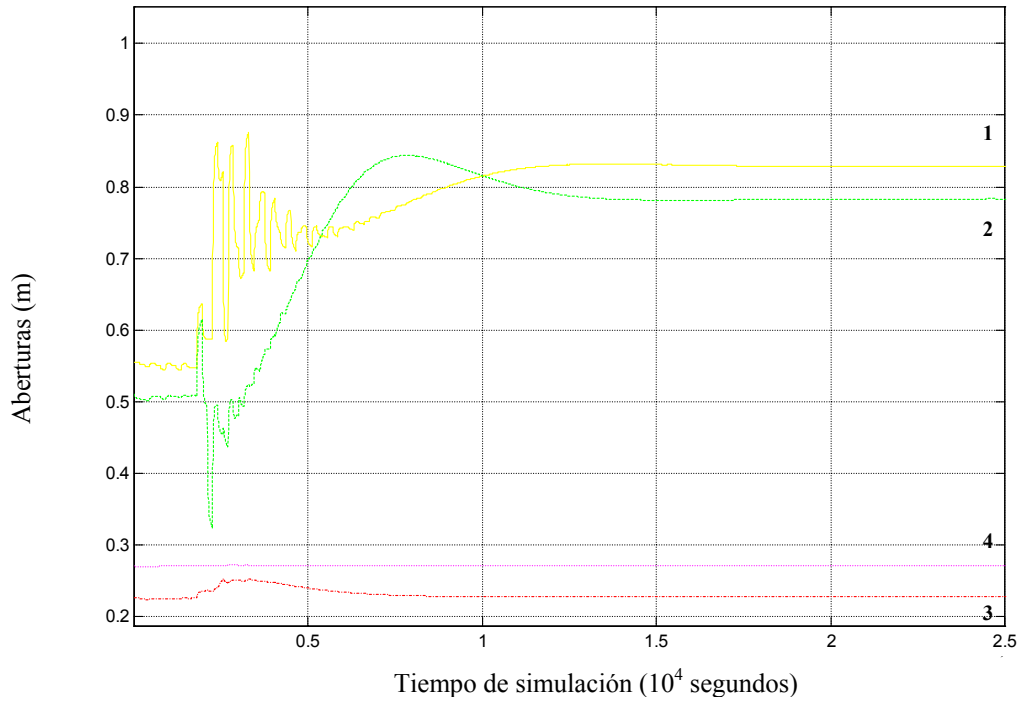


Figura 48. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 3 del canal 1  
Experimento MK2'

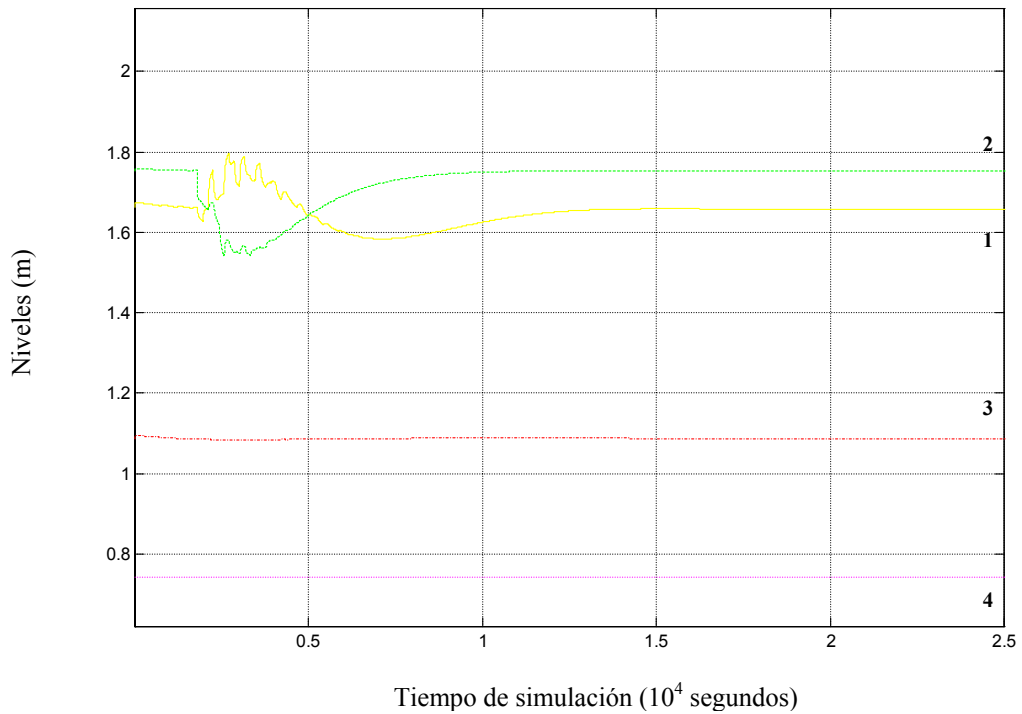


Figura 49. – Evolución de niveles (m) en el experimento 3 del canal 1  
Experimento MK2'



### **Experimento 4 (HY2')**

En este experimento se simula una extracción de  $+1'4 \text{ m}^3/\text{s}$  en el segundo tramo de canal, en el instante  $t = 0'5 \text{ horas} = 1800 \text{ segundos}$ . Esta extracción se simula mediante un decremento de  $34'07 \text{ centímetros}$  en la cota del vertedero de dicho tramo, que pasa de un valor de  $1'196 \text{ metros}$  a  $0'855 \text{ metros}$ .

Utilizar un limitador de incrementos de caudales permite, como se ha observado en el experimento 2, reducir la energía de control, y además, reducir el tiempo de convergencia global de canal. Cuando no se usa el limitador, la respuesta del tramo primero frente a la perturbación en el tramo segundo puede llegar a ser exagerada, de modo que se genera un déficit exagerado en el primer tramo. Mediante el limitador, se genera una respuesta más suave aguas arriba, de modo que no se desajusta un tramo de canal para ajustar otro. El tiempo de convergencia de los tramos primero y segundo es de  $3500$  y  $3200$  segundos, utilizando limitador, y de  $4500$  y  $2300$  , sin limitador.

Los nuevos indicadores de rendimiento MAE e IAE muestran que en el caso del controlador de Muskingum, los niveles afectados por la perturbación se desvían mucho más y durante mayor tiempo que en el caso de Hayami. El indicador IAQ confirma lo mostrado por el indicador MC.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)	MAE	IAE	IAQ (m3/s)
Tramo 1	3500	0,0067	0,2823	0,0697	0,0062	1,3973
Tramo 2	3200	0,0036	0,4556	0,0565	0,0041	1,0489
Tramo 3	0	0,0026	0,0288	0,0063	0,0021	0,1250
Tramo 4	0	0,0001	0,0042	0,0004	0,0002	0,0295
<b>Canal 1</b>	3500	0,0130	0,7709	0,0697	0,0126	2,6007

*Tabla 28 – Indicadores de rendimiento del experimento 4 en el canal 1*

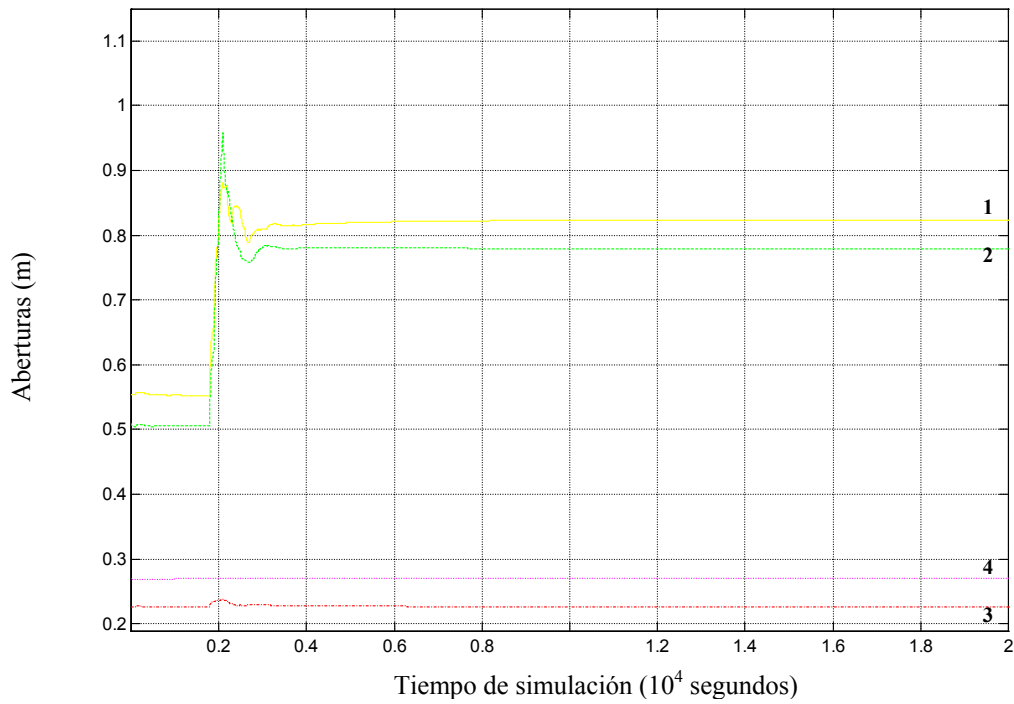


Figura 50. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 4 del canal 1  
Experimento HY2'

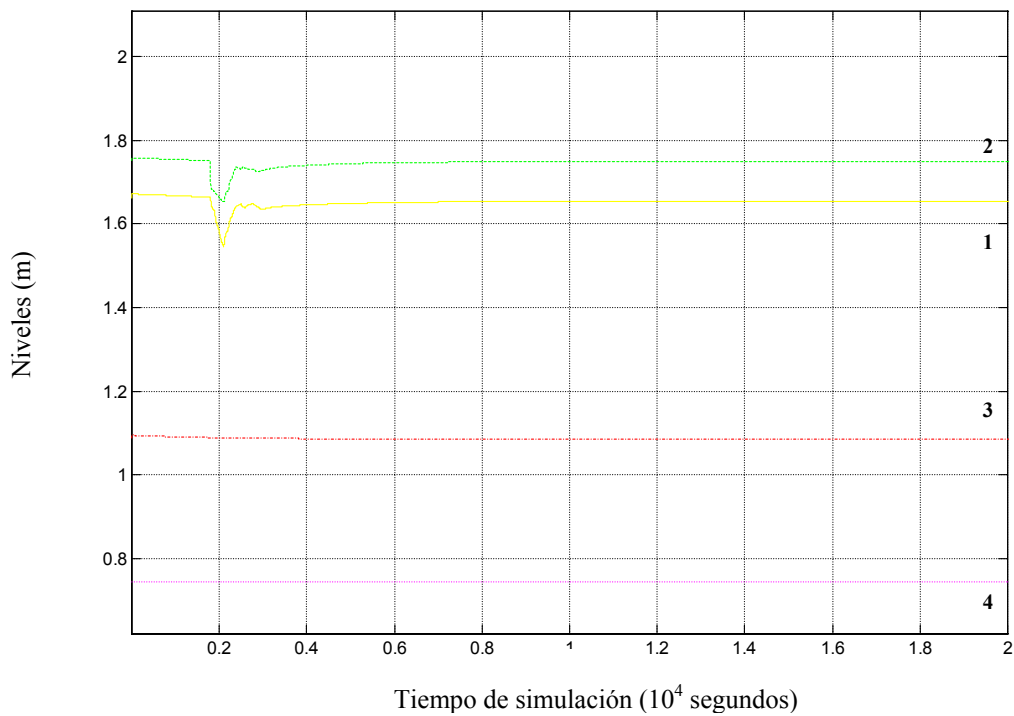


Figura 51. – Evolución de niveles (m) en el experimento 4 del canal 1  
Experimento HY2'

**Experimento 5 (MK3')**

En este experimento se simula dos extracciones de +1 m<sup>3</sup>/s en los tramos primero y tercero en el instante t = 0'5 horas = 1800 segundos. Estas extracciones se simulan mediante un decremento de las cotas de los vertederos laterales de 31'97 y 32'18 centímetros respectivamente, de modo que las cotas de los vertederos laterales pasan de 1'397 metros a 1'010 metros, y de 0'829 metros a 0'507 metros, respectivamente.

Nuevamente, el uso de un paso de tiempo de muestreo inferior permite una reducción de los tiempos de convergencia, a cambio de un mayor desperdicio de energía en la abertura de compuertas.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)	MAE	IAE	IAQ (m3/s)
Tramo 1	7200	0,0036	2,4702	0,1634	0,0140	14,8908
Tramo 2	8850	0,0014	2,3651	0,0426	0,0053	6,8699
Tramo 3	7050	0,0001	0,3039	0,1879	0,0183	2,6410
Tramo 4	0	0,0000	0,1915	0,0061	0,0002	0,3658
<b>Canal 1</b>	8850	0,0051	5,3307	0,1879	0,0378	24,7675

*Tabla 29 – Indicadores de rendimiento del experimento 5 en el canal 1*

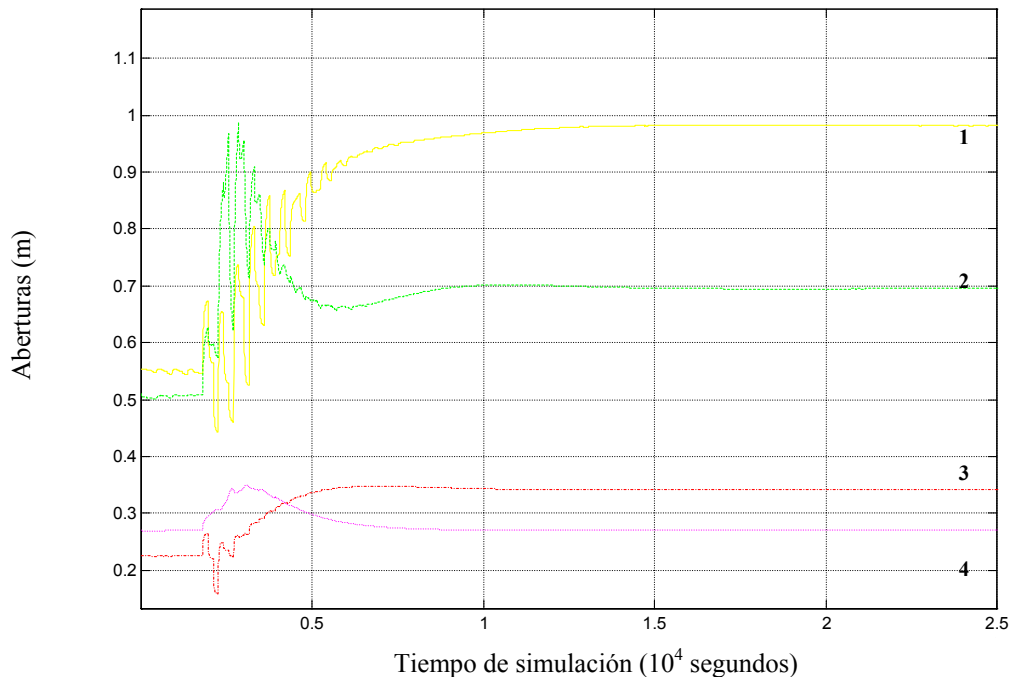


Figura 52. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 5 del canal 1  
Experimento MK3'

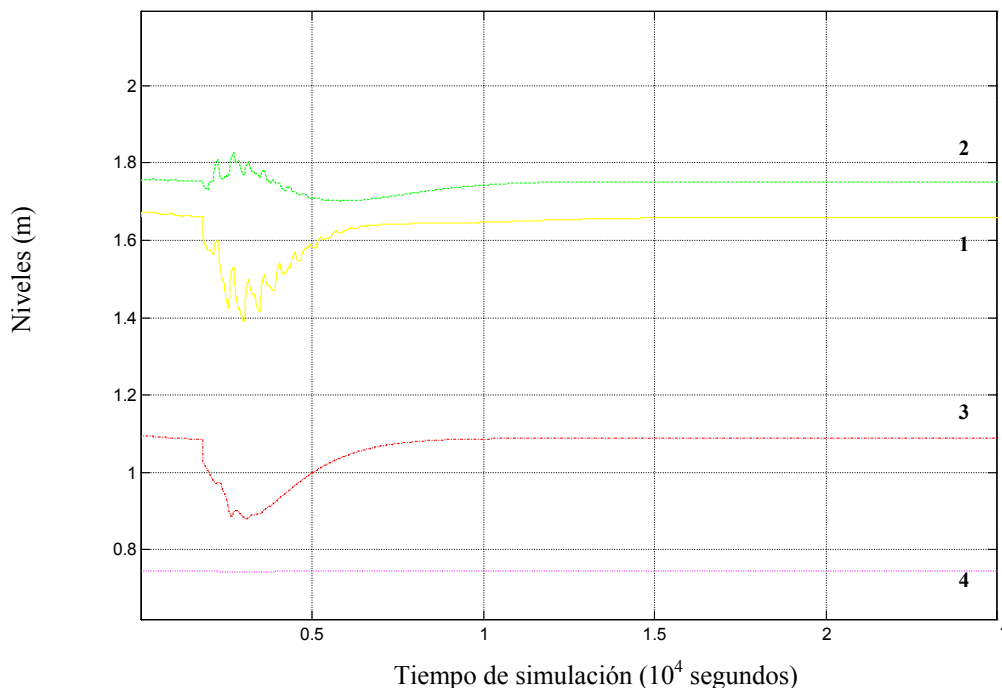


Figura 53. – Evolución de niveles (m) en el experimento 5 del canal 1  
Experimento MK3'

### **Experimento 6 (HY3')**

En este experimento se simula dos extracciones de +1 m<sup>3</sup>/s en los tramos primero y tercero en el instante  $t = 0,5$  horas = 1800 segundos. Estas extracciones se simulan mediante un decremento de las cotas de los vertederos laterales de 31'97 y 32'18 centímetros respectivamente, de modo que las cotas de los vertederos laterales pasan de 1'397 metros a 1'010 metros, y de 0'829 metros a 0'507 metros, respectivamente.

Este experimento permite observar que el uso de un limitador puede ser contraproducente.

Con relación a la energía de control sigue siendo beneficioso, ya que se consume menos energía, pero con relación al tiempo de convergencia, en este caso es negativo.

Limitar la compuerta que gestiona un tramo donde se produce la perturbación no es beneficioso. Si se comparan los tiempos de convergencia en los tramos primero y tercero, en el caso de utilizar limitador, 5100 y 4400 segundos, frente los 3900 y 3900 segundos, en el caso de no utilizarlo, se puede concluir que su uso limita la velocidad de convergencia.

	TC (seg)	EN (m)	MC (m)	MAE	IAE	IAQ (m <sup>3</sup> /s)
Tramo 1	5100	0,0042	0,2326	0,1025	0,0083	1,1095
Tramo 2	2300	0,0038	0,5757	0,0411	0,0021	1,2012
Tramo 3	4400	0,0021	0,0771	0,1022	0,0092	0,5700
Tramo 4	0	0,0000	0,0724	0,0011	0,0001	0,1740
<b>Canal 1</b>	5100	0,0101	0,9578	0,1025	0,0197	3,0547

*Tabla 30 – Indicadores de rendimiento del experimento 6 en el canal 1*

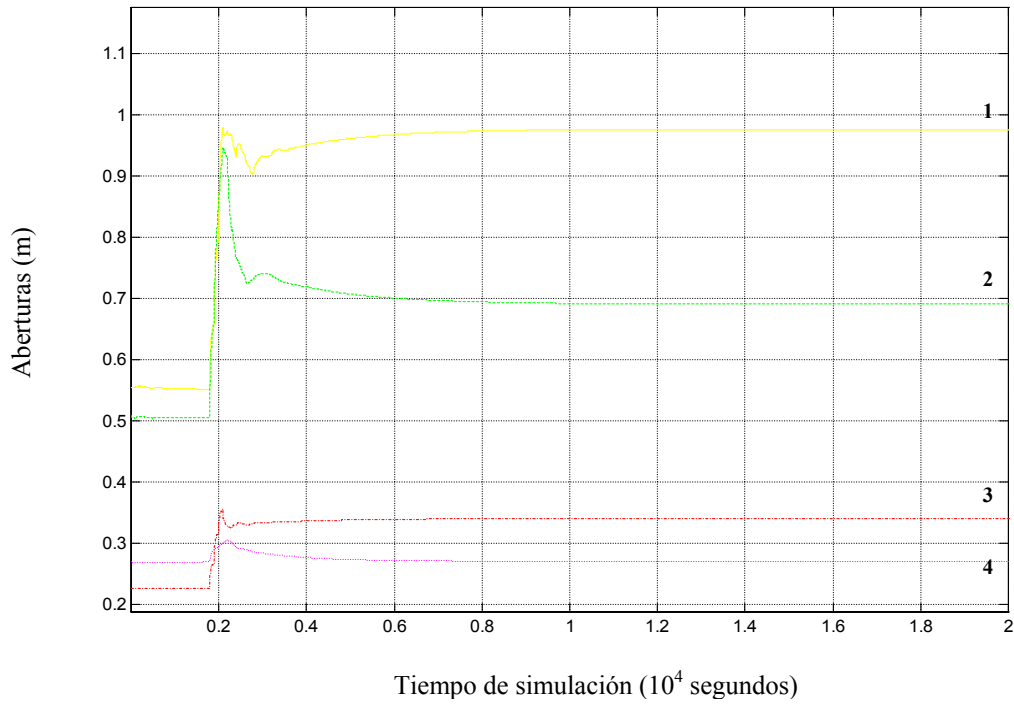


Figura 54. – Aberturas de compuertas (m) en el experimento 6 del canal 1  
Experimento HY3'

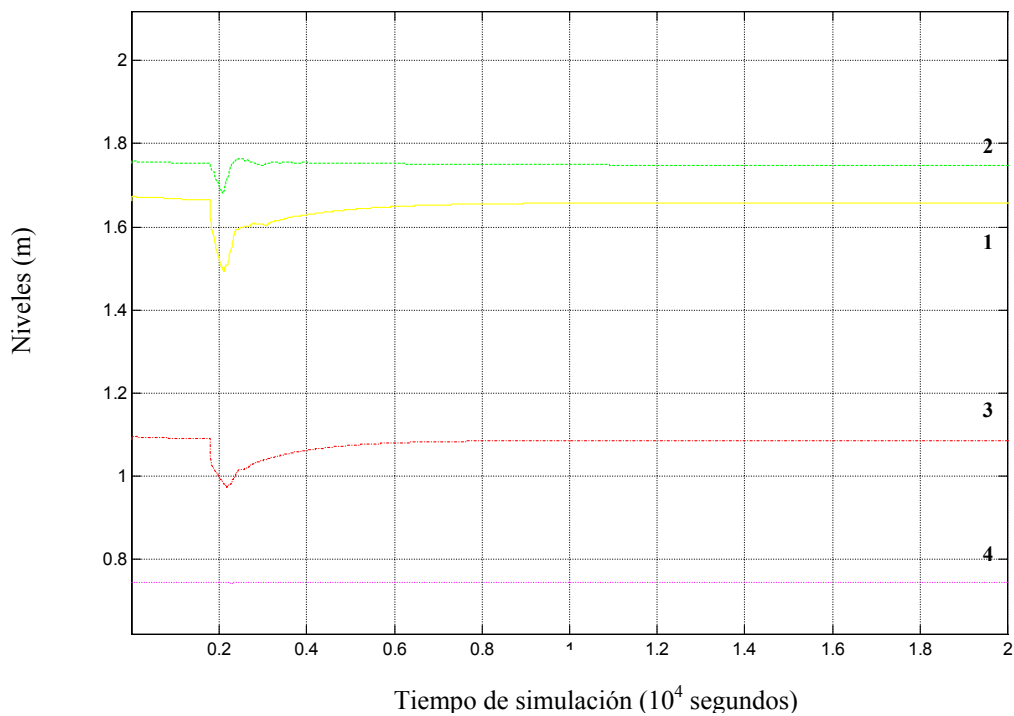


Figura 55. – Evolución de niveles (m) en el experimento 6 del canal 1  
Experimento HY3'

## **5.5 – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

### **5.5.1- Canal de cuatro tramos**

*Experimentos 1(MK1) y 2(HY1).*

La respuesta en el caso de HY1 es mucho más eficiente, con un tiempo de convergencia de canal de 6800 segundos, frente a los 12000 de MK1. Los movimientos de compuertas (MC) también son más eficientes, 0,5822 frente a 0,6522.

*Experimentos 3(MK2) y 4(HY2).*

En estos experimentos, el controlador de Hayami se muestra claramente superior, obteniendo la convergencia del canal en 4500 segundos, frente los 13250 de Muskingum. Los movimientos de compuerta vuelven a ser inferiores en Hayami, 1,4959 frente a 1,9818.

*Experimentos 5(MK3) y 6(HY3).*

De las tres situaciones simuladas para el canal de 4 tramos, ésta es en la que el controlador de Hayami se muestra más superior; con un tiempo de convergencia de canal de 3900 segundos y unos movimientos de compuerta (MC) de 1,7450, supera claramente en rendimiento al controlador de Muskingum, que ofrece unos valores de 10000 y 3,3255, respectivamente.

### **5.5.2- Canal de ocho tramos**

*Experimentos 1(MK4) y 2(HY4).*

La respuesta obtenida en HY4 es mucho más veloz, 14500 segundos de tiempo de convergencia del canal frente a 27200, y más eficiente energéticamente (MC), 1,2143 frente a 1,9193.

*Experimentos 3(MK5) y 4(HY5).*

En estos experimentos, el controlador de Hayami sigue siendo claramente superior, ofreciendo una respuesta más rápida, que permite obtener un tiempo de convergencia de canal de 11900 segundos, muy inferior a los 24650 obtenidos en el caso de Muskingum. En cuanto a movimientos de compuerta, Hayami aún se muestra más superior, presenta un valor de MC de 0,9489 metros, frente a los 2,6508 de Muskingum.

*Experimentos 5(MK6) y 6(HY6).*

En estos experimentos, Hayami se muestra netamente superior con relación al tiempo de convergencia, 15300 segundos frente a 30000, pero no tanto con relación a los movimientos de compuerta, 5,1984 metros frente a 5,8823.

### **5.5.3- Canal de cuatro tramos (Nuevos ajustes)**

*Experimentos 1(MK1') y 2(HY1').*

Los cambios introducidos en los experimentos, únicamente provocan una variación de la energía de control, aumentándola en el caso de Muskingum y reduciéndola en el caso de Hayami. Los indicadores MC y IAQ lo muestran, 0,4470 y 2,2757 en Hayami, frente a 0,9401 y 5,0383 en Muskingum. Con relación al tiempo de convergencia, Hayami sigue siendo mejor, con 6900 segundos frente a 12000.

*Experimentos 3(MK2') y 4(HY2').*

En estos experimentos, los cambios introducidos producen el mismo efecto que en los experimentos 1 y 2, no obstante, sí que afectan al tiempo de convergencia, en el caso del controlador de Hayami, aumentándolo en el tramo donde se produce la perturbación, y reduciéndolo en los tramos situados aguas arriba de ésta, y en el caso de Muskingum reduciéndolos. Los nuevos indicadores MAE y IAE muestran que los niveles afectados por la perturbación se desvían mucho más y durante mayor tiempo del nivel de consigna en el caso de Muskingum, 0,1190 y 0,0306 frente a 0,0697 y 0,0126.

*Experimentos 5(MK3') y 6(HY3').*

En estos experimentos, los ajustes introducidos en los controladores vuelven a producir los efectos comentados anteriormente. Los nuevos indicadores confirman los resultados obtenidos con anterioridad, Hayami converge más rápido, 5100 segundos frente a 8850, se desvía menos, 0,1025 metros frente a 0,1879, y durante menos tiempo, 0,0197 frente a 0,0378, de los niveles de consigna, y gestiona mejor los movimientos de compuertas, 0,9578 m y 3,0547 m<sup>3</sup>/s frente a 5,3307 m y 24,7675 m<sup>3</sup>/s.

En todas las situaciones simuladas, el controlador de Hayami presenta una respuesta mucho más eficiente. Produce una respuesta tan rápida y enérgica desde aguas arriba, que los tramos situados aguas arriba de la perturbación no se ven tan afectados como en el caso de Muskingum. En los experimentos simulados utilizando el controlador de Muskingum, los tramos situados aguas arriba de las perturbaciones presentan unos valores del tiempo de convergencia muy superiores frente a los valores obtenidos en el caso de Hayami. Se puede decir que parece que cada controlador presenta una estrategia de trabajo distinta. Muskingum detecta un problema en el canal (cambio de consigna o perturbación), y lo soluciona desplazando el problema hacia aguas arriba, de modo que los tramos van convergiendo desde aguas abajo hacia aguas arriba. En cambio, Hayami detecta el problema y lo soluciona recurriendo a los tramos situados aguas arriba, pero desestabilizándolos lo mínimo posible.