

# Modelo numérico para el estudio de canales de aprovechamiento hidroeléctrico

M. GOMEZ (\*)  
A. BATEMAN (\*)  
J. DOLZ, (\*)

**RESUMEN.** Se presenta un modelo numérico para el estudio del flujo no permanente en canales de aprovechamientos hidroeléctricos, desarrollado por encargo de las compañías eléctricas operantes en Cataluña. Como características del mismo podemos indicar la inclusión del mayor número posible de estructuras especiales que se presentan en estos canales como aliviaderos laterales, sifones invertidos, etc. Dicho modelo se ha validado mediante ensayos de campo en canales reales.

**ABSTRACT.** *A hydraulic numerical model to analyse unsteady flow in hydroelectric canals has been developed for the electric companies in order to study the reform projects for old canals. Special attention has been paid to the set of boundary conditions that are presented (inverted siphons, lateral weirs, etc.). Field tests are being carried out to validate the model.*

## INTRODUCCION

Los aprovechamientos hidroeléctricos de tipo fluyente constituyen un esquema de producción energética habitual en regiones montañosas de nuestro país. Muchos de estos aprovechamientos, en particular los canales de conducción, fueron construidos a principios de siglo. El desarrollo energético posterior primó en ocasiones la producción de tipo térmico frente a la de estos saltos, lo que ocasionó en algunos casos un deterioro de sus instalaciones de obra civil (canal, etc.). La situación actual, con unos costes energéticos más elevados, ha hecho que se considere la posibilidad de aumentar su producción mediante obras de mejora o ampliación. El esquema hidráulico de dichos saltos es muy sencillo: azud de derivación, canal de transporte, cámara de carga y tubería forzada. Intentar aumentar la producción energética de dichos saltos, dejando a un lado la intervención sobre la maquinaria de producción, supone en general aumentar el caudal de paso mediante una reforma del canal de transporte, reduciendo las pérdidas de caudal por filtración, etc., la sustitución de estructuras como los sifones invertidos por acueductos en lámina libre, o la mejora de la rugosidad de las paredes del mismo. Los tres efectos se traducen en el deseado aumento de caudal de paso y en consecuencia en un aumento de la producción de energía.

Las maniobras en estos canales antiguos se realizaban las más de las veces de forma manual. La experiencia adquirida por el personal durante décadas era suficiente para operar de forma segura estos canales. Así, conexiones y desconexiones eran realizadas sin problemas y el conocimiento sobre el modo de reaccionar del canal era también fruto de esa experiencia. Pero en el momento en que se pretendía reformar dicho canal, aumentando el rango de caudales de operación y en ocasiones de forma importante, se carecía de la experiencia necesaria para determinar el comportamiento del canal. En vista de este problema, las compañías eléctricas operantes en el nordeste de España, FECSA, ENHER, HECSA, ERZ y FS, decidieron encargar la elaboración de un modelo numérico que simulara el comportamiento hidráulico de un canal tipo de un aprovechamiento hidroeléctrico.

## CARACTERISTICAS DEL MODELO DE SIMULACION

El movimiento del agua en el canal, en régimen no permanente gradualmente variable, se puede describir mediante las ecuaciones de Saint-Venant. En el caso de canales de tipo prismático son:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A}{b} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(J_0 - I_f) = 0 \quad (2)$$

(\*) Departamento de Ingeniería Hidráulica. E.T.S. Ingenieros de Caminos de Barcelona. UPC. Barcelona.

donde  $y$ ; calado,  $v$ , velocidad media;  $A$ , sección transversal del flujo;  $b$ , ancho superficial;  $g$ , aceleración de la gravedad;  $I_b$ , pendiente de la solera del canal;  $I_r$ , pendiente motriz;  $x$ , distancia considerada a lo largo del canal;  $t$ , tiempo. Entre los diferentes métodos numéricos de integración de las ecuaciones se escogió el método de las características por razones tales como la gran experiencia adquirida con su empleo en otros problemas y su especial capacidad de tratar condiciones de contorno de todo tipo. Métodos en diferencias finitas explícitas presentan el inconveniente de no poder considerar por sí mismos de forma correcta las condiciones de contorno del problema, siendo fundamental incluir la existencia de aliviaderos laterales, compuertas de derivación, sifones invertidos, etc.

Los métodos en diferencias finitas implícitas tampoco fueron adoptados en este caso ya que algunas maniobras, por ejemplo paradas de máquina por causa accidental, se realizan en tiempos pequeños (10 a 20 segundos) y el modelo numérico debería emplear intervalos de tiempo del mismo orden. En este caso, dichos esquemas pueden requerir mayor tiempo de ordenador frente a la solución considerada finalmente, el método de las características en su aproximación recta y explícita (figura 1).

$$V_P - V_R + \frac{g}{C_R} (y_P - y_R) - g \cdot \Delta t (I_s - I_{r1}) = 0 \quad (3)$$

$$V_P - V_S - \frac{g}{C_S} (y_P - y_S) - g \cdot \Delta t (I_s - I_{r2}) = 0 \quad (4)$$

En base a este esquema numérico, se desarrolló y puso a punto un modelo numérico capaz de reproducir el

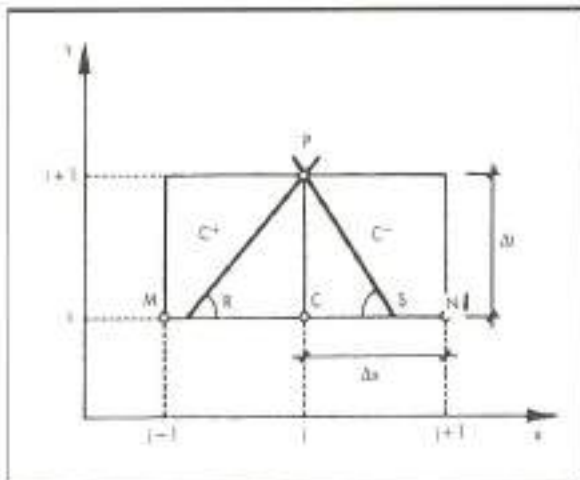


FIGURA 1. Esquema numérico de solución.

comportamiento hidráulico de un canal de tipo hidroeléctrico. El canal se discretiza en tramos y nudos de unión. Cada tramo no es más que una porción de canal que presenta una geometría constante (sección, pendiente), lo mismo que su rugosidad. Dichas características pueden cambiar tramo a tramo, separados entre sí por nudos de unión. En dichos nudos se localizan a su vez todas las condiciones de contorno del canal (aliviaderos laterales, compuertas, escalones de solera, etc.). Los incrementos de espacio utilizados fueron de 50 m, como compromiso entre la precisión deseada y el tiempo de cálculo en ordenador.

### CONDICIONES DE CONTORNO CONSIDERADAS

El principal interés del modelo residía en incluir el mayor número posible de singularidades propias de los canales hidroeléctricos. Así podemos encontrar:

- Obras de toma, normalmente equipada con compuertas para regular el caudal de entrada en el canal. En este caso, el comportamiento conjunto del río, el azud de derivación y las compuertas de toma, es estudiado por el modelo.
- Aliviaderos laterales, que actúan como vertederos de seguridad eliminando los excesos de caudal que se pueden haber introducido en el canal.
- Compuertas laterales, para limpieza del canal o para derivar caudales de servidumbre de riego.
- Escalones de solera.
- Sifones invertidos, usados para cruzar barrancos.
- Cámara de carga, considerando el área de la cámara, el aliviadero de seguridad existente y la entrada en las tuberías forzadas.

Cambios de sección, de pendiente o de rugosidad en el canal, podían ser incluidos en el modelo. Se prestó especial atención a la modelación hidráulica de los sifones invertidos y de la cámara de carga.

### SIFONES INVERTIDOS

Muchos canales hidroeléctricos estudiados presentan en su traza un sifón invertido, dispuesto para superar el paso de algún barranco o valle. Por facilidad de construcción, los ingenieros de principios de siglo optaron por situar sifones en vez de acueductos a pesar de las mayores pérdidas de carga que producen. El tipo de flujo en las tuberías del sifón se modela como sigue: movimiento en bloque del agua, considerando indeformables las paredes de la tubería y despreciando los efectos de golpe de ariete.

La ecuación de Bernoulli generalizada para el caso de flujo permanente y en tubería prismática ( $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ ) es la siguiente:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \Delta B = I_f \quad (5)$$

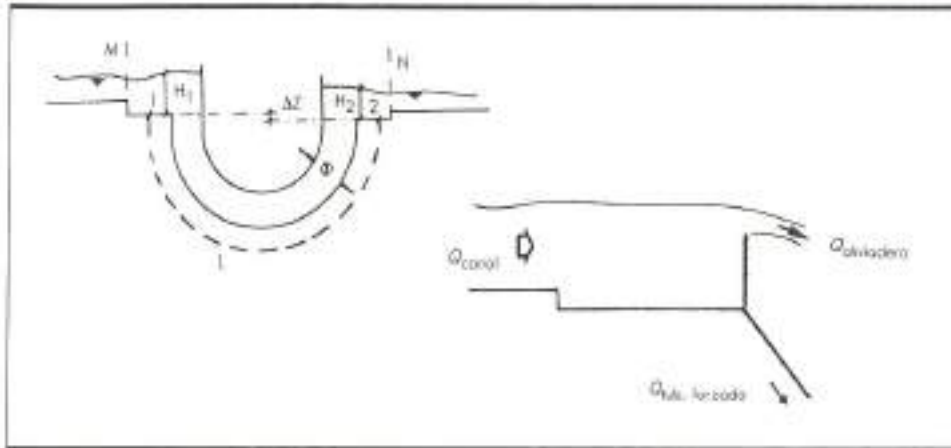


FIGURA 2. Esquema de sifón y cámara de carga.

integrando desde 1 hasta 2, obtendremos:

$$\frac{L}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + B_2 - B_1 = LI_f + \sum K \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

donde  $L$  es la longitud de la tubería;  $v$ , velocidad media en la tubería;  $B$  es el trinomio de Bernoulli;  $I_f$  pendiente motriz en la tubería;  $\sum K$  es la suma de coeficientes de pérdidas de carga localizadas a lo largo del sifón (entrada, salida, codos interiores, etc.). Normalmente a la entrada y salida del sifón se sitúa una pequeña cámara de carga. Así, despreciando la energía de velocidad en los extremos, podemos plantear la ecuación (6) entre las cámaras de entrada y salida:

$$\frac{L}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t} + z_2 + H_2 - (z_1 + H_1) = LI_f + \sum K \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

donde  $z$  es la cota y  $H$  el nivel de agua en las cámaras de entrada y salida. Si consideramos esta ecuación junto a las que ya podíamos plantear:

- 2 ecuaciones características  $C^+$ ,  $C^-$  en los puntos  $M$  y  $N$  como último y primer punto respectivamente de los tramos adyacentes.

- 2 ecuaciones de conservación de la energía entre los puntos  $M-1$ , y  $2-N$ .
- 2 ecuaciones de continuidad, para cada una de las cámaras de entrada y salida.

$$Q_M - Q_{\text{carga}} = \frac{\Delta \text{Almacenamiento}_1}{dt}$$

$$Q_{\text{carga}} - Q_N = \frac{\Delta \text{Almacenamiento}_2}{dt}$$

nos permite plantear un sistema de 7 ecuaciones, no lineal, para resolver el flujo en el sifón invertido con 7 incógnitas:

- Velocidad y calado en el punto  $M$
- Velocidad y calado en el punto  $N$
- Nivel de agua en las cámaras 1 y 2
- Caudal a través del sifón invertido.

#### CAMARA DE CARGA

Se trata de otra de las condiciones de contorno más importantes en la modelación del canal. Caudal del canal, tuberías forzadas y aliviadero de seguridad deben

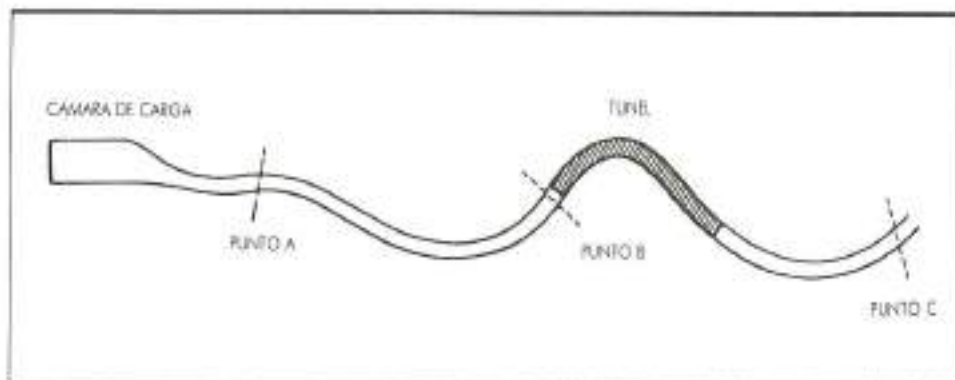


FIGURA 3. Esquema del canal en los ensayos de validación.

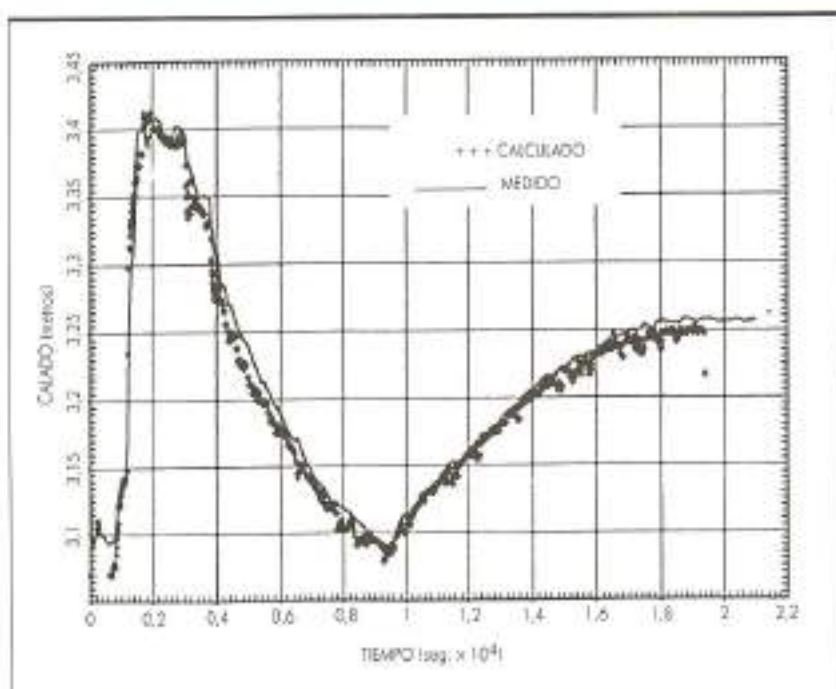


FIGURA 4. Punto B.  
Comparación  
numérico-experimental.

considerarse junto a las variaciones de almacenamiento que se producen en la misma. El flujo en presión en las tuberías forzadas se modeló de una manera similar a lo visto para el sifón invertido, sin considerar los efectos de golpe de ariete sobre la tubería y centrándose en las repercusiones de las maniobras en central sobre el canal. El modelo numérico debía poder considerar toda una serie de situaciones de flujo, en función de si el nivel de agua estaba por encima o por debajo del nivel del aliviadero, si el flujo circulaba por una o dos tuberías forzadas, etc.

### VALIDACION DEL MODELO

Con objeto de validar el modelo numérico desarrollado, se llevaron a cabo una serie de ensayos de campo sobre el canal de Anzánigo, propiedad de ERZ, en la provincia de Huesca. Dicho canal fue elegido al reunir una serie de circunstancias que lo hacían representativo (existencia de sifón invertido, aliviaderos laterales, etc.) así como por disponer de una completa información topográfica en todo su trazado.

Se seleccionó en particular un tramo de 1.500 m, cercano a la cámara de carga. Diversos cierres y aperturas de turbinas se llevaron a cabo, registrándose la evolución del nivel de agua en tres puntos A, B y C, mediante sensores de nivel. Estas maniobras fueron reproducidas por el modelo numérico, considerando los registros de los puntos A y C como condiciones de con-

torno. Los resultados numéricos obtenidos para el punto B se compararon con los datos experimentales, considerando el coeficiente de rugosidad de Manning como el único parámetro de ajuste. Dichos resultados se presentan en la figura 4, para un valor de la rugosidad  $n = 0,020$  que refleja el estado del canal, pues éste presentaba gran cantidad de sedimentos en su base así como la existencia de vegetación adherida a las paredes del canal en las partes altas del mismo. Otros ensayos de validación se realizan en diferentes canales con objeto de seguir el proceso de validación del modelo numérico.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado bajo el patrocinio de las compañías eléctricas FECSA (Fuerzas Eléctricas de Cataluña), ENHER (Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana), HECSA (Hidroeléctrica de Cataluña), ERZ (Eléctricas Reunidas Zaragozanas) y FS (Fuerzas Eléctricas del Segre).

### REFERENCIAS

- LAI, C. (1986). «Numerical Modeling of Unsteady Open-Channel Flow», en «Advances in Hydrosociences, Vol. XIV. Ed. B. C. Yen. Academic Press.
- CUNGE, J. HOLLY, F. M., VERWEY, A. (1980). «Practical Aspects of Computational River Hydraulics» Pitman Press, Boston.