

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XI CONGRESO CHILENO

METODOLOGIA PARA RESOLVER LAS ECUACIONES DE SAINT-VENANT

EN VARIOS TRAMOS. COMPROBACION EXPERIMENTAL

TOMAS GONZALEZ DEL B. ⁽¹⁾

GABRIEL MATTHEY C. ⁽²⁾

HORACIO MERY M. ⁽³⁾

RESUMEN

El estudio de fenómenos transitorios en canales abiertos, reviste gran importancia en el diseño de obras hidráulicas, como son las centrales hidroeléctricas, los canales matrices en los sistemas de riego, los canales de descarga de plantas elevadoras de aguas servidas, los canales colectores de aguas lluvias, etc. Maniobras bruscas de válvulas o compuertas, o alteraciones súbitas causadas por la propia naturaleza, pueden producir variaciones en el caudal y en las condiciones del escurrimiento, cuyas situaciones extremas deben ser analizadas al proyectar y dimensionar una determinada obra. Habitualmente, los canales abiertos se encuentran constituidos por varios tramos e incluyen una serie de singularidades, como pueden ser los sifones, las cámaras de carga, descargas, gradas, etc., razón por la cual es fundamental abordar el problema en forma integral, considerando estos aspectos.

En este trabajo, como un primer paso, se establece una metodología para resolver las ecuaciones de Saint-Venant en el caso de un canal de varios tramos, incorporando el concepto de "condición de borde interna" al modelo numérico MOC-A (Método de las Características aplicado a canales abiertos, Ref.5). Los resultados se comparan con las mediciones obtenidas de una serie de experiencias realizadas en el Canal Matriz del Embalse Paloma, observándose un buen ajuste entre la simulación computacional y la situación real, lo cual constituye una verificación y validación, a escala real, del modelo numérico desarrollado como parte del proyecto Fondecyt 1084-92.

(1) Ingeniero Civil, Profesor Auxiliar, Depto. de Ing. Civil, Universidad de Chile.

(2) Ingeniero Civil, Profesor a cargo del Laboratorio de Hidráulica, Depto. de Ing. Civil, U. de Chile.

(3) Ingeniero Civil, Profesor Titular, Depto. de Ing. Civil, Universidad de Chile.
Asesor de la Dirección de Riego, MOP.

1. INTRODUCCION

La importancia que tiene el estudio del flujo transitorio en el diseño de canalizaciones abiertas, y lo poco que se ha hecho al respecto en nuestro país, motivó al Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile a iniciar esta línea de investigación, financiada por el Proyecto Fondecyt 1084-92. En una primera etapa, se analizaron diferentes alternativas para la integración numérica de la ecuaciones de Saint-Venant, llegando finalmente a seleccionar aquellos modelos numéricos que presentaron las mejores ventajas de procesamiento y simulación del fenómeno (Modelo de Diferencias Finitas, MDF-A, y Modelo de las Características MOC-A, Ref.6).

En este XI Congreso, se presenta un primer trabajo titulado "Verificación Experimental de Métodos Numéricos para Resolver las Ecuaciones de Saint-Venant", Ref.5, donde se estudia el comportamiento del régimen transitorio en canales de características únicas. Sin embargo, en la mayoría de los casos reales, los canales están constituidos por varios tramos, incluyendo algunas singularidades que pueden influir en el fenómeno transitorio. Por esta razón, el análisis se extiende a un canal compuesto por varios tramos, es decir, un canal con secciones de características diferentes, para lo cual se introduce en el modelo numérico el concepto de condición de borde interna.

Para realizar la verificación y validación del modelo numérico, se realizaron experiencias en el canal matriz del Embalse Paloma, el cual está compuesto por tramos de diferentes características, donde se realizaron mediciones en distintas secciones sobre una longitud que comprende los primeros 8 Km.

En este trabajo, en primer lugar se describe la metodología usada para abordar la condición de borde interna dada por el cambio de sección, usando el método de las Características, y en seguida se realiza una comparación entre los resultados obtenidos de la simulación computacional con los registrados en la obra real.

2. CONDICION DE BORDE INTERNA

2.1 Cambio de Sección sin Pérdida de Carga

El análisis de la condición de borde interna dada por el cambio de sección, se aborda usando el método de las características, de Hartree (MOC-B, Ref.5). La suposición es considerar que el Bernoulli se mantiene constante, entre la sección de aguas arriba y la sección de aguas abajo, tal como se indica en la Fig.1.

La condición de igualdad de Bernoulli entre las secciones 1 y 2, equivale a considerar despreciables las pérdidas de energía en la singularidad en cuestión, y se expresa por la relación:

$$z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

Además se debe cumplir la ecuación de continuidad :

$$Q_1 = v_1 S_1 = v_2 S_2 = Q_2 \quad (2)$$

Esto implica despreciar la acumulación o devolución de caudal en la transición. Ahora bien, el método numérico para resolver la singularidad, usando el método de las características, cuyas ecuaciones se basan en el esquema de la Fig.2 , tienen la siguiente expresión:

$$v_1 - v_R + \frac{g}{C_R} (h_1 - h_R) + g(J_R - i_1) \Delta t = 0 \quad (3)$$

$$x_1 - x_R = (v_R + C_R) \Delta t \quad (4)$$

y

$$v_2 - v_S - \frac{g}{C_S} (h_2 - h_S) + g(J_S - i_2) \Delta t = 0 \quad (5)$$

$$x_2 - x_S = (v_S - C_S) \Delta t \quad (6)$$

Las características de los puntos "R" y "S" se obtienen mediante interpolación de los puntos conocidos "NI-2", "NI-1", "NI" y "NI+1", como se muestra en la Fig.2. La determinación de los puntos "R" y "S" se hacen con el método de Hartree de aproximaciones sucesivas. Por otra parte, de la ecuación (2) se despeja el valor de la velocidad para el punto 2, en función de la velocidad en el punto 1 y la relación entre sus áreas, vale decir:

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} \quad (7)$$

Denominando " $S_1 / S_2 = k_s$ " y " $Z_1 - Z_2 = AG$ " (considerada como una altura de grada), el desarrollo de las ecuaciones conduce a:

$$h_1 = \frac{\left(\frac{h_R}{C_R} + \frac{h_S}{C_S k_S} \right) + \left(\frac{v_R}{g} - \frac{v_S}{g k_S} \right) - \frac{1}{C_S k_S} \left(AG + \frac{v_1^2}{2g} (1 - k_S^2) \right) - \Delta t \left(J_R - i_1 - \frac{J_S}{k_S} + \frac{i_2}{k_S} \right)}{\left(\frac{1}{C_R} + \frac{1}{C_S k_S} \right)} \quad (8)$$

$$h_2 = (Z_1 - Z_2) + h_1 + (1 - K_S^2) \frac{v_1^2}{2g} \quad (9)$$

En que las velocidades " v_1 " y " v_2 ", se obtienen de las ecuaciones (3) y (5) respectivamente.

2.2 Cambio de Sección con Pérdida de Carga.

Para considerar las pérdidas de carga en el cambio de sección, en la ecuación de Bernouilli representada por (1), simplemente se debe agregar el término de la pérdida que involucra esta singularidad, es decir:

$$z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + P_{12} \quad (10)$$

En que la pérdida de carga "P₁₂", se puede expresar como:

$$P_{12} = C_c \frac{\Delta v^2}{2g} = C_c \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (11)$$

Donde "C_c" es un coeficiente que depende de si hay aceleración o desaceleración del escurrimiento en el cambio de sección. De esta manera, cuando existe una aceleración, es decir "v₂>v₁", entonces "C_c=0.1", y cuando existe una desaceleración, es decir "v₂<v₁", el coeficiente "C_c=0.2", (Ref.2).

En base a lo anterior, el valor de "h₁" toma la forma:

$$h_1 = \frac{\left(\frac{h_R}{C_R} + \frac{h_S}{C_S K_S} \right) + \left(\frac{v_R}{g} - \frac{v_S}{g K_S} \right) - \frac{1}{C_S K_S} \left(AG - P_{12} + \frac{v_1^2}{2g} (1 - K_S^2) \right) - \Delta t \left(J_R - i_1 - \frac{J_S}{K_S} + \frac{i_2}{K_S} \right)}{\left(\frac{1}{C_R} + \frac{1}{C_S K_S} \right)} \quad (12)$$

y "h₂", de la ec.(10), resulta:

$$h_2 = (Z_1 - Z_2) + h_1 + (1 - K_S^2) \frac{v_1^2}{2g} - P_{12} \quad (13)$$

3. APLICACION AL CANAL MATRIZ PALOMA

3.1 Descripción del canal

El canal matriz del Embalse Paloma es de sección trapecial, con taludes variables entre 1/0.96 y 1/2.20 (H/V), un ancho basal variable entre 2.4 m y 2.6 m, una pendiente media de fondo fluctuante entre 0.3% y 0.5% y un largo total de 25950 m. Está construido en mampostería de piedra y hormigón, excepto en una longitud de 1205 m en que no se encuentra revestido. Su capacidad máxima alcanza a los 8 m³/s. Es alimentado directamente desde el embalse Paloma, a través de dos válvulas de chorro hueco cónico de 1 m de diámetro cada una, que son accionadas manualmente.

3.2 Secciones de control para la experimentación.

De acuerdo a los objetivos de la investigación, y a partir de un análisis previo de las características del canal matriz, se decidió considerar los primeros 8 km para realizar las experiencias, los cuales incluyen un primer tramo de canal desde el Km 0 al Km 1950, un sifón intermedio desde el Km 1950 al Km 2600, y un segundo tramo de canal desde el Km 2600 al Km 8400, el que termina en el sifón Quebrada Seca.

El sifón intermedio, el cual corresponde al sifón Paloma, en su entrada presenta un escurrimiento libre, es decir, no se encuentra ahogado, teniendo una condición de altura crítica en ese punto dada por un cambio en la pendiente del canal.

Las posibles secciones de control se eligieron en función de las características del canal, sus principales singularidades y la representatividad del sector considerado. La selección definitiva de ellas se hizo después del reconocimiento del terreno, tomando en cuenta además el número de personas disponibles para realizar las mediciones de niveles. Se adoptaron finalmente 6 secciones de control, cuya ubicación en planta se esquematiza en el trazado de la Fig.3, (Secciones S1, S2, ..., S6).

3.3 Experimentación

Se realizaron 4 experiencias, considerando un tiempo suficientemente largo de separación entre ellas, para asegurar así la estabilización del flujo y la no influencia de unas con otras. Adicionalmente se midió un eje hidráulico, con el objeto de estimar el actual coeficiente de rugosidad de Manning del sector de experimentación.

Las experiencias se hicieron sincronizadamente con la maniobra de las válvulas, las cuales, por ser accionadas en forma manual, se operaron con tiempos de cierre y abertura relativamente lentos, variables entre 1.5 y 3.0 minutos.

En cada sección hubo dos personas a cargo de las mediciones, una controlando el tiempo con la ayuda de un cronómetro, y la otra midiendo los niveles con reglillas graduadas o limnímetros. En las secciones 1 y 3 las mediciones se realizaron directamente con los limnímetros existentes. Por otra parte, en las secciones 2, 4, 5 y 6, ellas se realizaron a través de reglillas graduadas, especialmente diseñadas para tales efectos.

Finalmente, hubo una persona que coordinó, sincronizó y supervisó las operaciones y mediciones, desplazándose entre la cámara de válvulas y las 6 secciones de medida.

3.4 Determinación de Caudales

Se realizaron cuatro experiencias de variaciones de caudal en el extremo de aguas arriba: dos de disminución de caudal, seguidas por dos de aumento de caudal. Entre cada experiencia hubo un tiempo razonablemente largo, de tal manera de llegar a un régimen prácticamente permanente.

La determinación de los caudales de inicio y término de cada experiencia, se efectuó a partir del escurrimiento crítico que se produce en la entrada al Sifón Paloma, relacionándolo éste con las alturas medidas en la sección 3, como si se tratara de un aforador. Este procedimiento tiene la ventaja de no depender de la rugosidad del canal, lo cual da mayor confiabilidad si se considera que el coeficiente de Manning actual, en rigor es desconocido.

Los caudales así obtenidos, en l/s, además de los tiempos que demoraron las maniobras, en seg, se incluyen en la siguiente tabla:

Exp.1	Qi	7000	Tm
	Qf	4100	160
Exp.2	Qi	4100	Tm
	Qf	1650	110

Exp.3	Qi	1650	Tm
	Qf	4550	198
Exp.4	Qi	4550	Tm
	Qf	7000	130

3.5 Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning

Para realizar la comparación entre los valores medidos en terreno y los obtenidos mediante la simulación del modelo numérico, en esta primera etapa se consideró solamente el tramo de canal ubicado aguas arriba del Sifón Paloma, donde se distinguen dos subtramos de secciones con características diferentes. El primero, comprendido entre el Km 0.125 y el Km 1.825, donde la rugosidad tuvo que ser determinada, y el segundo, entre el Km 1.825 y el Km 1.925, subtramo muy corto donde la rugosidad se consideró igual a la de diseño, vale decir $n = 0.016$.

La determinación de la rugosidad en el primer subtramo, se realizó midiendo un eje hidráulico en el terreno, que considera el caudal adoptado para la experiencia N°3, de $Q=4550$ l/s. Este eje hidráulico se calculó para diferentes rugosidades y el mejor ajuste entregó un valor del coeficiente de Manning de " $n = 0.0225$ ", el cual resultó mayor que la rugosidad original de diseño, $n = 0.019$, debido al crecimiento de algas y alteraciones experimentadas por el canal después de varios años de operación.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Los valores registrados en terreno que aquí se presentan, comprenden al tramo de canal descrito en el punto anterior, y corresponden a los fenómenos transitorios observados debido a aumentos y disminuciones del caudal, producto de la aberturas y cierres de las válvulas a la entrada del sistema. El canal analizado en el modelo computacional es de una longitud de 1800 m, entre el Km 0.125 y el Km 1.925, por cuanto la turbulencia de la descarga influye en los primeros 125 m, dando lugar a un fenómeno localizado que escapa a los alcances de este estudio. Por esta razón, la variación del gasto se consideró en el Km 0.125 y no en el Km 0 donde se encuentran las válvulas.

La simulación computacional se hizo considerando los dos subtramos definidos anteriormente. Las condiciones de borde

quedaron definidas por variaciones lineales del gasto, dadas por aberturas o cierres de válvulas en el extremo de aguas arriba, y una condición de curva de descarga en el extremo de aguas abajo. El cambio de sección se abordó como una condición de borde interna, tal como se explicó anteriormente. El tiempo real en el que se consideró el fenómeno fue de 60 min. Los resultados obtenidos se presentan en forma gráfica, al final de este trabajo.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos por la simulación del modelo computacional, entregan un balance volumétrico con un error entre un 6% y un 12 %, lo cual puede considerarse aceptable para un análisis de este tipo.

Los resultados de la simulación se ajustan bastante bien a los medidos en el terreno, lo cual verifica y valida el modelo, a partir de la observación del fenómeno transitorio en un canal real.

El modelo opera correctamente en canales de sección rectangular y trapecial, incluyendo cambios de sección, los cuales son tratados como condiciones de borde internas. Esto deja abierta la posibilidad de ampliar la investigación, de tal manera de considerar otras singularidades, además de la virtual presencia de ondas secundarias debido a cambios rápidos en las condiciones de borde del sistema.

Los resultados obtenidos de las experiencias realizadas en el Canal Matriz del Embalse Paloma, demuestran que la información es confiable y de buena calidad, razón por la cual puede prestar muchos beneficios en la continuación de esta investigación, considerando que la información total comprende los 8 primeros kilómetros del canal, incluyendo el Sifón Paloma y varios subtramos de canales con secciones de diferentes características.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 Chaudhry, M.H., "Applied Hydraulic Transients". Second Edition.
- 2 French, R.H., "Hidráulica de Canales Abiertos". Mc Graw-Hill, 1988.
- 3 Mahmood, K., and Yevjevich, V., "Unsteady Flow in Open Channel". VOL I.
- 4 Martin, C.S., and DeFazio, F.G., "Open-Channel Surge Simulation by Digital computer". Journ. of the Hydr. Div., Vol 95, Nº6, NOV 1969.
- 5 Mery, H. y González, T., "Verificación Experimental de Métodos Numéricos para Resolver las Ecuaciones de Saint-Venant". XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, OCT, 1993.
- 6 Mery, H., Matthey, G., y González, T., "Métodos Numéricos para la Resolución de Fenómenos Transitorios en Canales". Segundas Jornadas de Hidráulica Francisco Javier Domínguez. NOV 1992.
- 7 Neger, R., "Escurremientos Impermanentes en Canales Abiertos. Comparación entre medidas en Prototipo y Cálculos Teóricos". XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Paulo Brasil.
- 8 Wylie, E.B., and Streeter, V.L., "Fluid Transient". Corrected Edition 1983.

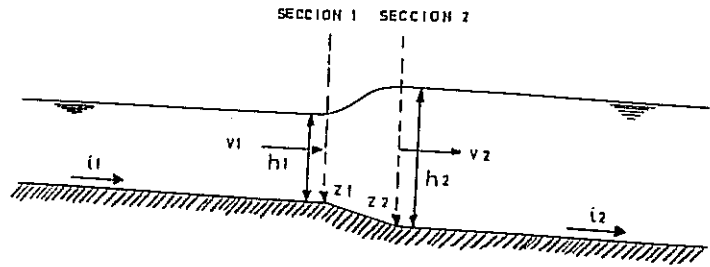


Fig. 1

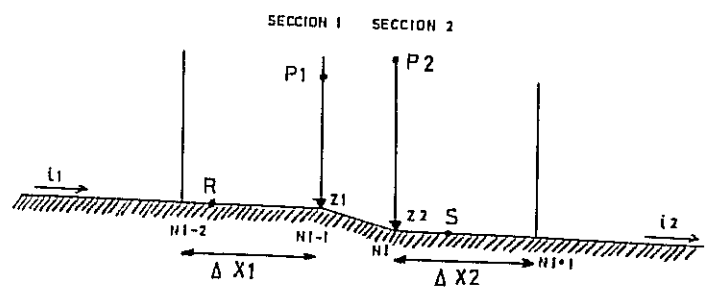


Fig. 2

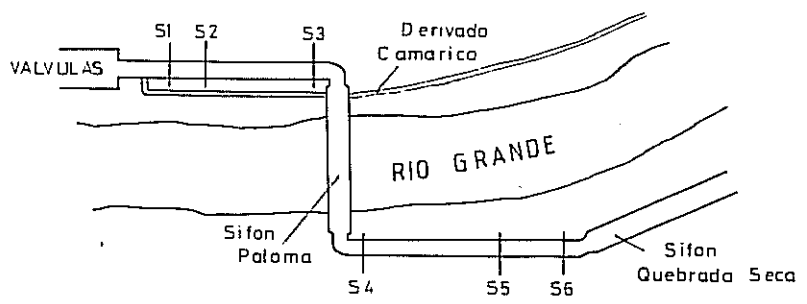
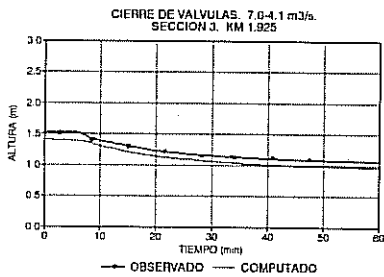
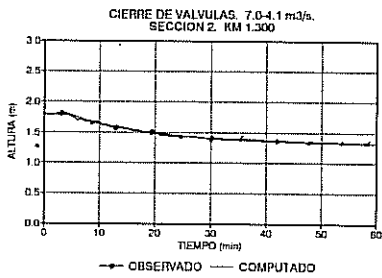
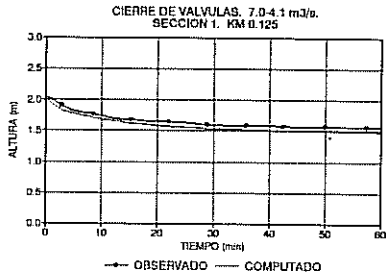
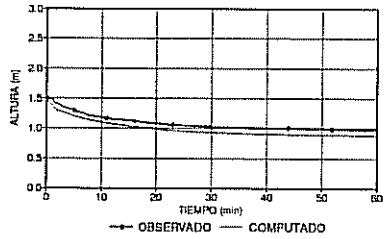


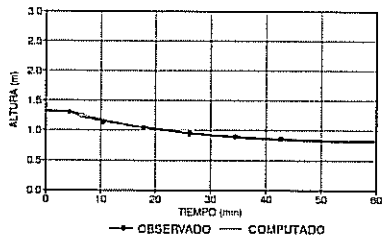
Fig. 3



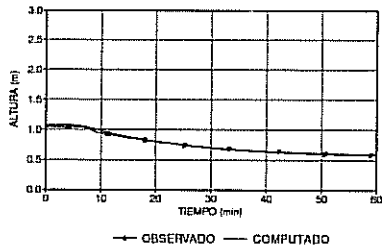
CIERRE DE VALVULAS. 4.1-1.65 m³/s.
SECCION 1. Km 0.125

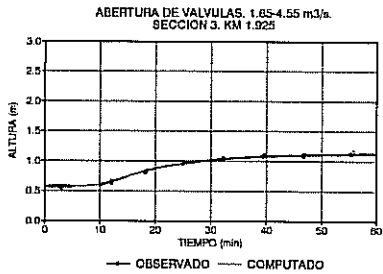
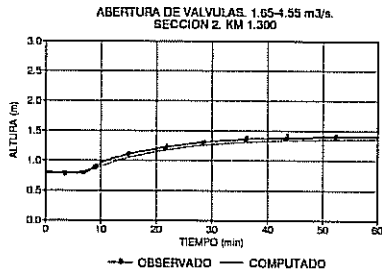
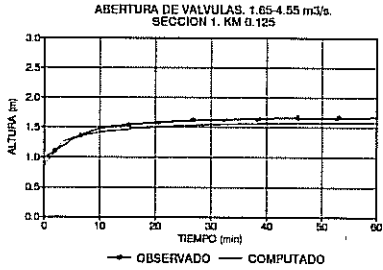


CIERRE DE VALVULAS. 4.1-1.65 m³/s.
SECCION 2. KM 1.300

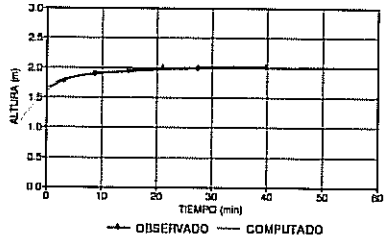


CIERRE DE VALVULAS. 4.1-1.65 M³/S.
SECCION 3. KM 1.925

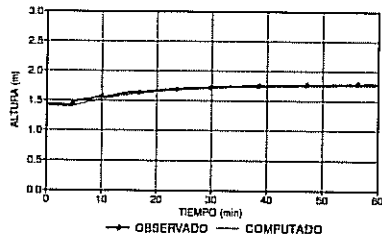




ABERTURA DE VALVULAS. 4.55-7.0 m³/s.
SECCION 1. KM 0.125



ABERTURA DE VALVULAS. 4.55-7.0 m³/s.
SECCION 2. KM 1.300



ABERTURA DE VALVULAS. 4.55-7.0 m³/s.
SECCION 3. KM 1.925

