



ENVOLVENTE DE LOS NIVELES MAXIMOS DURANTE UN RECHAZO TOTAL DE CARGA EN UNA CAMARA DE CARGA CON VERTEDERO LATERAL

LINCOLN ALVARADO.

Edic Ingenieros Limitada. lalvarado@edic.cl

HORACIO MERY

Dirección de Obras Hidráulicas. horacio.mery@moptt.cl

RICARDO SOTOMAYOR

Colbún S.A. rsotomayor@colbun.cl

RESUMEN

En esta publicación se propone un método de cálculo para determinar, en caso de un rechazo total de carga de una central hidroeléctrica, los sobre-niveles producidos por el recorrido de la onda en la cámara de carga y el tramo de canal frente al vertedero lateral, mediante la ecuación dinámica de las ondas positivas de frente vertical y la ecuación de la conservación de la masa.

Se plantean las relaciones algebraicas de cálculo que representan el fenómeno y se aplican para el caso de la Cámara de Carga de la Central Hidroeléctrica Rucúe. Los resultados se comparan con los obtenidos en un modelo hidráulico físico y con observaciones en el prototipo.

ABSTRACT

This report proposes a numerical to calculate the wave heights in an hydroelectric power plant forebay, causing by a total load shoutdown, along the forebay and the lateral spillways . The method is developed considering the dynamic equation of the vertical wavefront and the mass conservation equation.

Equations relative to this phenomenon have been applied to "Rucue's" hydroelectric power plant forebay. Results have been compared with those on the hydraulic model and those on the prototype.



ENVOLVENTE DE LOS NIVELES MÁXIMOS DURANTE UN RECHAZO TOTAL DE CARGA EN UNA CÁMARA DE CARGA CON VERTEDERO LATERAL

1 Introducción

Los problemas de flujo transitorio en los canales de aducción de las centrales hidroeléctricas plantean problemas complejos a los proyectistas. El presente trabajo aborda un caso muy frecuente en las centrales de pasada con aducción en canal.

En efecto, en la llegada del canal a la cámara de carga normalmente se dispone la obra de evacuación de los caudales excedentes, que corrientemente es un vertedero lateral adyacente a la cámara de carga. Este vertedero lateral generalmente dispone de un canal colector seguido de un rápido de descarga que conduce los caudales sobrantes hasta un cauce natural. La Figura 1 muestra la obra de evacuación de la Central Hidroeléctrica Rucué.

Un aspecto importante del diseño de la obra es determinar los niveles máximos en la cámara de carga y en el canal de aducción cuando se produce un rechazo total de carga de las unidades hidroeléctricas. La envolvente de los niveles máximos permite fijar las cotas de coronamiento de las obras.

El cierre de una unidad turbo-generadora toma tiempos muy cortos, del orden de los 10 segundos, a fin de no aumentar más allá de lo recomendable la sobre-velocidad de la unidad. De esta forma, las ondas que se generan en este caso son prácticamente de frente vertical. Por lo tanto desde el punto de vista práctico, puede aceptarse un cierre instantáneo de las unidades, con lo cual se genera una onda positiva de frente vertical que se desplaza hacia aguas arriba remontando la corriente.

Inicialmente, la onda generada en la cámara de carga, normalmente más profunda que el canal de aducción, llega en un tiempo muy breve a la transición entre el canal y la cámara de carga; en esta singularidad la onda aumenta su altura y se transmite hacia aguas arriba remontando la corriente del canal de aducción y se refleja como otra onda positiva que se desplaza hacia aguas abajo en la cámara de carga, con la misma altura de la onda transmitida hacia el canal de aducción. La onda reflejada llega en un tiempo muy corto al muro frontal de la cámara de carga reflejándose nuevamente, duplicando su altura y nuevamente avanza remontando hacia el canal de aducción.

Este proceso de tiempos muy cortos, debido a la longitud menor de la cámara de carga, equivale a que esta obra se comporte como un estanque de nivel horizontal, el cual queda determinado por las alturas de las ondas en el canal de aducción. La onda positiva que ingresa al canal se mueve paralelamente al vertedero lateral y paulatinamente disminuye su altura en la medida que el vertedero lateral evacua parte del caudal del canal de aducción.

En esta publicación se muestra como es posible determinar mediante un cálculo aproximado, la envolvente de los niveles máximos de la onda en su avance hacia aguas arriba. El método propuesto utiliza la ecuación dinámica de las ondas positivas de frente vertical y la relación de continuidad o conservación de la masa.



2 Método de cálculo

Un rechazo total de carga de una central hidroeléctrica provoca en la cámara de carga una primera onda que se desplaza hacia aguas arriba, remontando el escurrimiento del canal de aducción. La presencia de un vertedero lateral hace que la altura de la onda disminuya paulatinamente a medida que se desplaza hacia aguas arriba paralelamente al vertedero lateral.

Para el cálculo de la envolvente de los niveles máximos generados por la cabeza de la onda en su desplazamiento, se hacen las siguientes hipótesis

- El rechazo de carga es instantáneo.
- Las ondas generadas son de frente vertical.
- Detrás del frente de onda el nivel es horizontal.
- El cálculo se efectúa en forma discreta para intervalos de avance de la onda de “ Δx ”.

Se analizará el caso de un canal de sección rectangular de ancho “b” con un vertedero lateral de longitud “ L_v ”, tal como se muestra en la Figura 2. Además se supone que el régimen permanente inicial tiene el espejo de agua coincidiendo con el umbral del vertedero lateral, es decir:

$$h_0 = a \quad (a = \text{altura del paramento del vertedero lateral}) \quad (1)$$

$$v_0 = \frac{Q_0}{b \times h_0} \quad (\text{velocidad del escurrimiento permanente inicial}) \quad (2)$$

En una onda de frente vertical de altura “h” que avanza hacia aguas arriba, la altura total del escurrimiento una vez que ha pasado la onda será:

$$h = h_0 + h' \quad (3)$$

La velocidad de avance de la cabeza de la onda hacia aguas arriba, aplicando el Principio de la Cantidad de Movimiento en sección rectangular, es:

$$c = \sqrt{g \times h} \times \sqrt{\frac{h + h_0}{2h_0}} - v_0 \quad (4)$$

A fin de analizar el proceso de avance de la onda paralelamente al vertedero lateral evacuador, se considera un volumen de control constituido por el cuerpo del canal rectangular en el tramo del vertedero lateral. Aplicando el principio de Conservación de Masa en el tiempo:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (5)$$



t_2 y t_1 son dos tiempos cualquiera durante el avance de la onda.

Se denominarán x_1 y x_2 los avances del frente de onda en los tiempos t_1 y t_2 respectivamente, medidos desde el extremo de aguas abajo del vertedero.

- Volumen de agua entrante al Vol. de control: $Q_0 \times \Delta t$ (6)

- Vol. de la masa de agua sobre el umbral del vertedero
en $t = t_1$: $h_1' \times x_1 \times b$ (7)

- Caudal evacuado por el vertedero lateral en t_1 : $m \times x_1 \times \sqrt{2g} \times h_1'^{3/2}$ (8)

- Vol. de la masa de agua sobre el umbral del vertedero
en $t = t_2$: $h_2' \times x_2 \times b$ (9)

- Caudal evacuado por el vertedero en t_2 : $m \times x_2 \times \sqrt{2g} \times h_2'^{3/2}$ (10)

Por lo tanto, durante el intervalo de tiempo " Δt " se puede hacer el siguiente balance de masas:

$$Q_0 \times \Delta t = (h_2' \times x_2 \times b - h_1' \times x_1 \times b) + \frac{Q_{v1} + Q_{v2}}{2} \times \Delta t \quad (11)$$

Q_{v1}, Q_{v2} son los caudales evacuados por el vertedero lateral en t_1 y t_2 respectivamente. El tiempo " Δt " se puede determinar conociendo las velocidades de las ondas:

$$\Delta t = \frac{2 \times (x_2 - x_1)}{(c_1 + c_2)} \quad (12)$$

Reemplazando el término " Δt " y ordenando la ecuación, se obtiene la siguiente relación:

$$Q_0 = b \times \frac{c_1 + c_2}{2} \times \left[\frac{x_1}{\Delta x} \times (h_2' - h_1') + h_2' \right] + C_v \times \frac{\Delta x}{2} \times \left[\frac{x_1}{\Delta x} \times (h_1'^{3/2} + h_2'^{3/2}) + h_2'^{3/2} \right] \quad (13)$$

$$C_v = m \times \sqrt{2g} . \quad (14)$$

Esta ecuación permite el cálculo por tanteos de la altura de la onda h_2' conociendo la altura de la onda h_1' para un Δx fijo.



3 Cámara de carga de la Central Hidroeléctrica Rucúe.

3.1 Descripción de la obra.

La Central Hidroeléctrica Rucúe, propiedad de Colbún S.A., capta aguas principalmente del río Laja ($130 \text{ m}^3/\text{s}$), poco aguas abajo del pueblo de Antuco, y del río Rucúe ($10 \text{ m}^3/\text{s}$). Las aguas son conducidas por un canal de 18 km de longitud hasta la zona de la Cámara de Carga, desde donde se origina una tubería que alimenta a 2 turbinas Francis con una potencia total de 178 MW.

En la zona de la Cámara de Carga se ubica la Obra de Seguridad que permite evacuar el caudal excedente del canal al ocurrir un rechazo de carga de la central. Ella está compuesta con un vertedero lateral de umbral cilíndrico de 155 m de longitud, a lo largo de un canal rectangular de 13,0 m de ancho, un canal colector y un rápido con su correspondiente disipador de energía que descarga las aguas al río Rucúe. La Figura 1 muestra esquemáticamente la zona del vertedero lateral.

3.2 Cálculo teórico

Para efecto de comparación con la experiencia realizada en el modelo, el cálculo teórico se realizó con un caudal en la aducción (Q) de $140 \text{ m}^3/\text{s}$ y un coeficiente de gasto (m), obtenido de los antecedentes del modelo, igual a 0,40. El valor de X se mide desde el extremo de aguas abajo del vertedero lateral:

Tabla 1.

h'_1 (m)	h'_2 (m)	x_1 (m)	x_2 (m)	C_1 (m/s)	C_2 (m/s)	t (s)
1,500	1,308	0	15	7,157	6,973	2,123
1,308	1,143	15	30	6,973	6,815	4,299
1,143	1,015	30	45	6,815	6,692	6,422
1,015	0,914	45	60	6,692	6,595	8,545
0,914	0,833	60	75	6,595	6,517	11,066
0,833	0,766	75	90	6,517	6,453	13,379
0,766	0,710	90	105	6,453	6,399	15,713
0,710	0,662	105	120	6,399	6,352	18,066
0,662	0,621	120	135	6,352	6,313	20,434
0,621	0,586	135	150	6,313	6,279	22,817
0,586	0,575	150	155	6,279	6,268	23,614

3.3 Modelo hidráulico

El modelo físico, escala 1:30, fue construido y operado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.



Las obras reproducidas en el modelo físico corresponden a un tramo del Canal de Aducción, la Cámara de Carga, el Vertedero Lateral, el Canal Colector y la transición entre el canal colector y el rápido de descarga y un tramo del rápido.

Las cotas del escurrimiento fueron medidas en escalas graduadas al milímetro adosadas a la pared izquierda de la Cámara de Carga. Debido a la rapidez con que ocurre el fenómeno, los registros se realizaron mediante filmación en video, desde donde con posterioridad se obtenía la información cuantitativa.

En el prototipo, el cierre de los álabes de las turbinas en un rechazo total de carga se produce en 10 s. Esto equivale en el modelo a 1,8 s, tiempo que se utilizó en el cierre de la compuerta que simulaba las turbinas.

La Experiencia 3-1 realizada con un caudal equivalente a $140 \text{ m}^3/\text{s}$ dio los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

X (m)	h' (m)
0,00	1,20
15,00	1,05
45,00	0,87
75,00	0,72
105,00	0,54
135,00	0,57
155,00	0,57

El tiempo equivalente que demoraba la onda en recorrer los 155 m del vertedero lateral fue de 24,6 s.

3.4 Observación en el prototipo

Observaciones realizadas para un rechazo de carga de $140 \text{ m}^3/\text{s}$ en la central Rucúe, con cierre simultáneo de ambas unidades en 10 s, indicaron los siguiente valores de la onda frente al vertedero lateral:

Tabla 3

X (m)	h' (m)
0,00	1,20
47,50	0,80
92,00	0,60
136,60	0,44

3.5 Comparación de resultados

La Figura 3 muestra un gráfico que compara los resultados de los valores obtenidos en el cálculo teórico, el modelo hidráulico y en el prototipo.

Los valores del cálculo teórico resultan algo mayores que los obtenidos en el modelo, o sea están por el lado de la seguridad. La diferencia se debe a que el modelo



considera un tiempo de cierre de 1,8 s (10 s en el prototipo) y en el cálculo teórico el cierre es instantáneo.

La comparación del tiempo que demora la onda en recorrer los 155 m del vertedero lateral en el cálculo teórico y en el modelo indica una diferencia de 1 s, o sea un 4%.

Los valores medidos en el modelo concuerdan razonablemente bien con los medidos en el prototipo.

4 Conclusiones

La comparación de los resultados obtenidos del cálculo teórico con los medidos en el modelo hidráulico y en el prototipo muestran que los valores del cálculo teórico son algo mayores que los medidos en el modelo. La diferencia se debe a que en el cálculo teórico el cierre se considera instantáneo, mientras que en la realidad el tiempo de cierre de los álabes de la turbina se cierran en 10 s.

5 Agradecimientos

Los autores agradecen a Colbún S.A. la autorización y facilidades para la presentación de este trabajo.

6 Referencias

CHOW Ven Te. Open – Channel Hydraulic. McGraw - Hill 1959. 680p.

DIVISION RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE. DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL. FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS. UNIVERSIDAD DE CHILE. Modelo Hidráulico Obra de Seguridad Central Rucúe. Informe Final. 1997. Estudio realizado para Colbún S.A.



Figura 1
Cámara de Carga Central Rucúe
vertedero lateral y canal colector

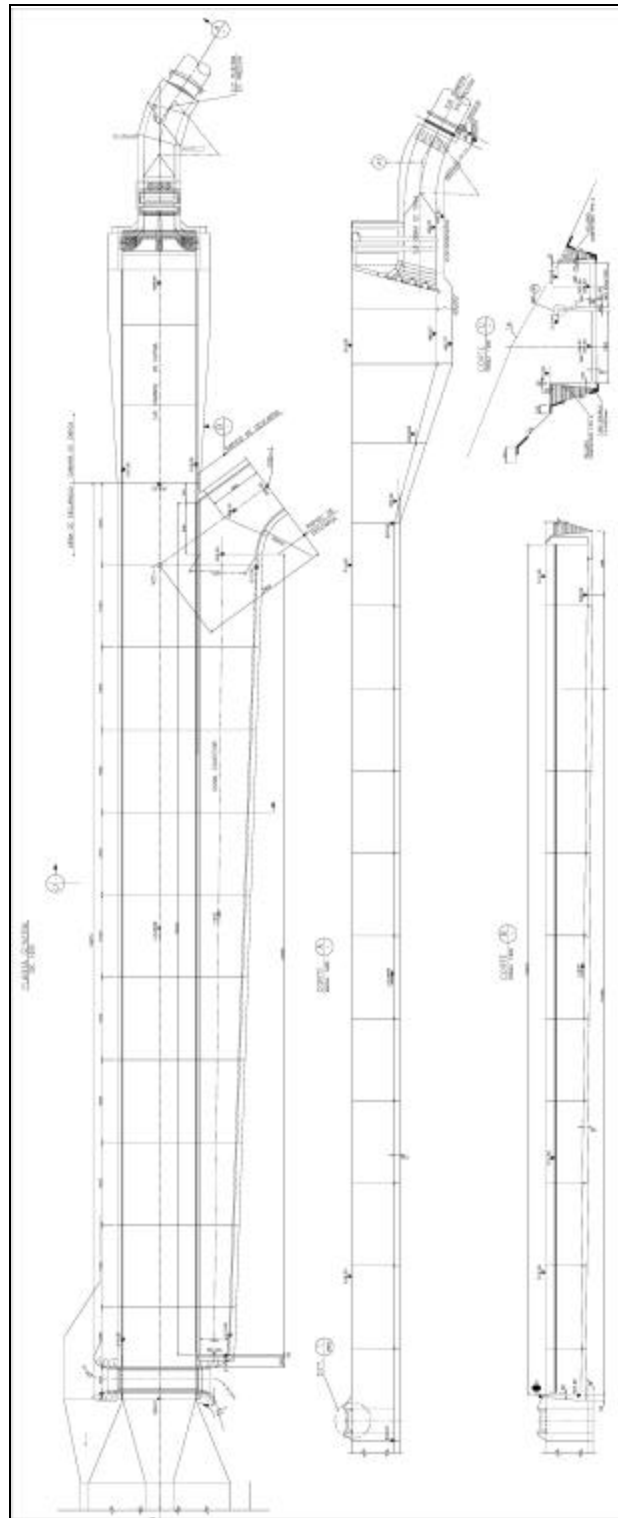




Figura 2
Definición de variables

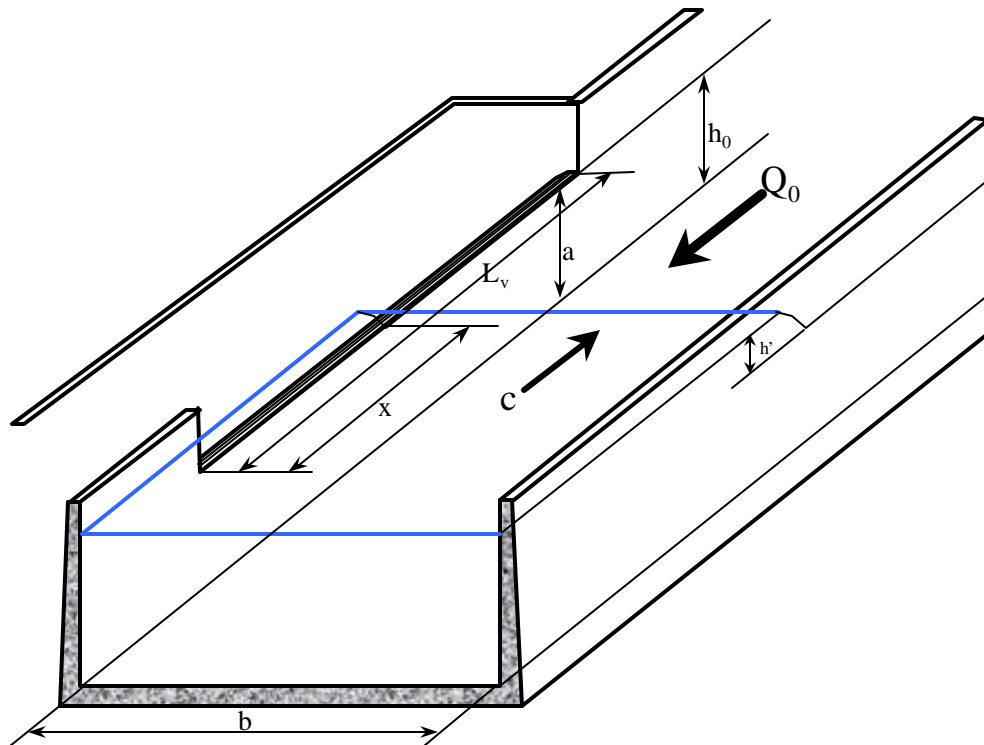


Figura 3

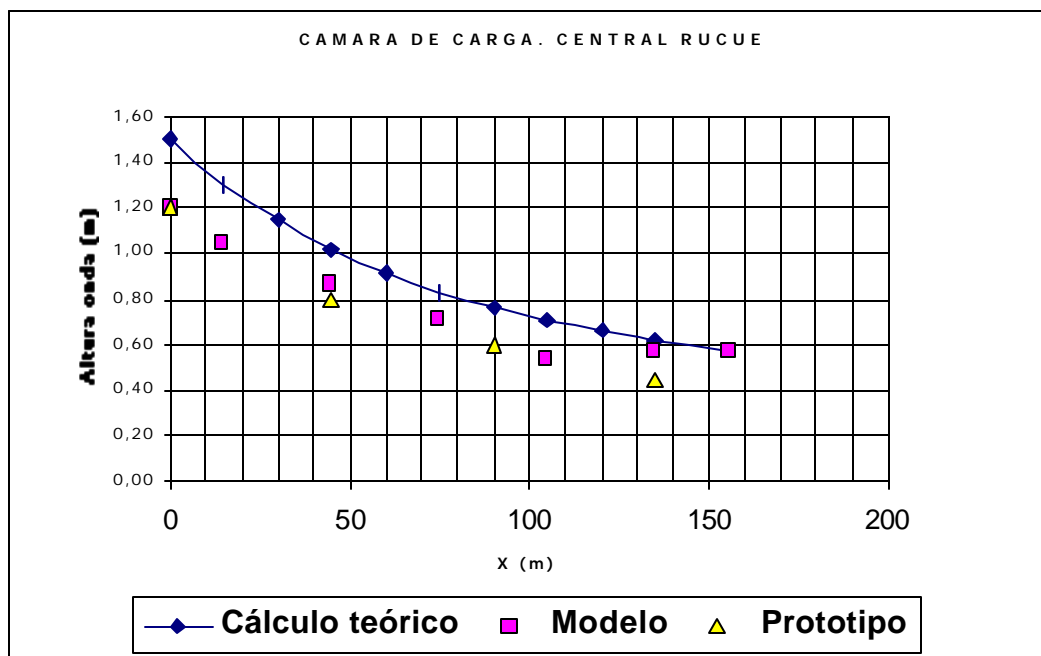




Foto 1
Frente de onda inicial en Cámara de Carga Central Rucúe



Foto 2
Régimen permanente final
(la marca de agua en la pared izquierda indica el tránsito del frente de onda)

