

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**ADUCCIÓN EN PRESIÓN CON CHIMENEA DE EQUILIBRIO.
TIEMPO CRÍTICO DE RECONEXIÓN POSTERIOR A UN RECHAZO DE CARGA.
APLICACIÓN.**

**LEONARDO CHAMORRO CH.¹
RICARDO RIEDEL G.²**

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la condición más crítica para efectuar una reconexión de caudal que produzca un nivel mínimo en la chimenea, posterior a un rechazo total de carga, en centrales hidroeléctricas dotadas de túnel de aducción en presión y chimeneas de equilibrio.

A partir del planteamiento de las ecuaciones del modelo rígido que gobiernan el escurrimiento transitorio en las aducciones de centrales hidroeléctricas, entre la captación y la chimenea de equilibrio, se determina el nivel crítico de la chimenea en su fase de descenso tal que en el túnel se alcance la mayor inercia y con ello el instante más desfavorable para realizar una reconexión de unidades.

A través de un análisis numérico de diferencias finitas de las ecuaciones completas del modelo elástico se estudia, para el caso de la Central Hidroeléctrica Ralco, el instante más crítico de reconexión de caudal posterior a un rechazo total de carga. Los resultados del modelo numérico se comparan con el análisis teórico efectuado.

¹ Ingeniero Civil. INGENDESA S.A. Académico Universidad de Chile. e-mail: lcc@ingendesa.cl

² Ingeniero Civil. Jefe grupo hidráulico INGENDESA. S.A. e-mail: riedel@ingendesa.cl

1. ESQUEMA GENERAL

El esquema típico de una aducción en presión con chimenea de equilibrio es la que se muestra en la Figura 1. En esta figura se definen las variables características.

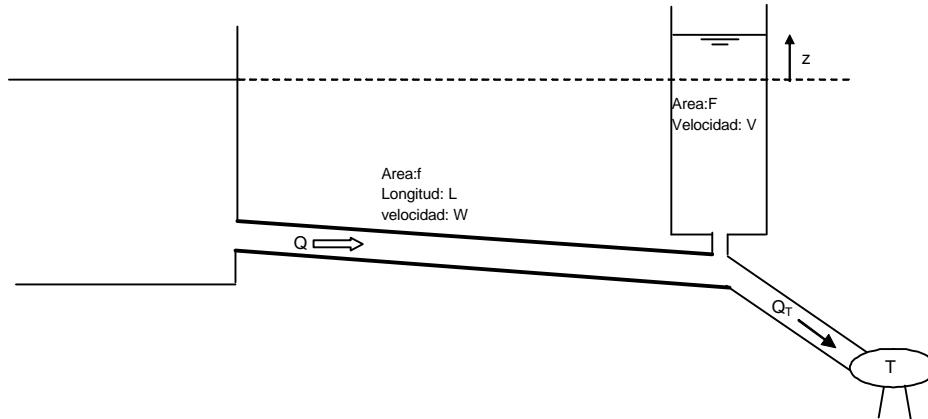


Figura 1

Geometría característica de una aducción en presión con chimenea de equilibrio.

2. ANÁLISIS

Tras un rechazo total de carga de la(s) unidad(es) generadora(s) en un sistema como el esquematizado en la figura N° 1, el nivel de aguas en la chimenea de equilibrio experimenta oscilaciones del tipo senoide amortiguada cuyas amplitudes tienden al nivel del embalse cuando el rechazo de carga es total. El grado de amortiguación depende de las pérdidas de carga en la aducción.

Como es bien sabido, el desequilibrio dinámico que se produce en el sistema embalse–chimenea de equilibrio, puede analizarse en forma satisfactoria y simple considerando el modelo rígido. El conjunto de ecuaciones necesarias para seguir la evolución de la chimenea corresponde a:

$$\frac{L}{g} \frac{dW}{dt} + Z + P = 0 \quad (1)$$

$$fW = FV + Q_T \quad (2)$$

$$V = \frac{dZ}{dt} \quad (3)$$

$$P = \pm P_0 (W / W_0)^2 \quad (4)$$

$$Q_T = Q_T(t) \quad (5)$$

Al considerar las variables reducidas: $z=Z/Z_*$, $p=P/Z_*$, $p_0=P_0/Z_*$, $q=Q_T/Q_0$, $w=W/W_0$, $v=V/(Q_0/F)$, $t'=t/T_*$, donde:

$$Z_* = W_0 \sqrt{\frac{L \times f}{g \times F}} \quad : \text{ amplitud de la oscilación en la chimenea en ausencia de fricción y}$$

$$T_* = 2p \sqrt{\frac{L \times F}{g \times f}} \quad : \text{ período de oscilación en ausencia de fricción}$$

P_0 : pérdida de carga inicial embalse-chimenea

Q_0 : caudal inicial

Q_T : caudal por la turbina

W_0 : velocidad inicial en el túnel

el sistema de ecuaciones (1) a (5) se transforma en el siguiente sistema reducido:

$$\frac{1}{2p} \frac{dw}{dt'} + z + p = 0 \quad (6)$$

$$w = v + q \quad (7)$$

$$v = \frac{1}{2p} \frac{dz}{dt'} \quad (8)$$

$$p = \pm p_0 w^2 \quad (9)$$

$$q = q(t) \quad (10)$$

Si se considera un rechazo total de carga tal que $q=0$ en $t=0^+$, en una primera fase el nivel de aguas en la chimenea sube y en tal caso el signo de la pérdida es positivo.

$$\frac{1}{2p} \frac{dv}{dt'} + z + p = 0 \quad (11)$$

el sistema de ecuaciones (6) a (10) se transforma en una ecuación de 2º orden al utilizar la transformación clásica:

$$\frac{dv}{dt'} = \frac{dv}{dz} \frac{dz}{dt'} = \frac{dv}{dz} 2pv \quad (12)$$

De este modo se obtiene:

$$\frac{d}{dz}(v^2) + 2p_0 v^2 = -2z \quad (13)$$

Como en $t'=0$: $w=v=1$ y $z=-p_0$, la solución de la ecuación es:

$$v^2 = -\frac{1}{2p_0^2} e^{-2p_0(p_0+z)} + \frac{1}{2p_0^2} - \frac{z}{p_0} \quad (14)$$

Un valor interesante de esta ecuación se produce cuando $v=0$, que representa el máximo nivel de la chimenea. Este valor máximo z_m satisface la ecuación no lineal:

$$1 - e^{-2p_0(p_0+z_m)} - 2p_0z_m = 0 \quad (15)$$

Ahora bien, en una segunda fase, luego de alcanzarse el nivel máximo en la chimenea se produce la inversión del flujo en el túnel y con ello el descenso de aguas en la chimenea. En esta fase, la ecuación (13) se transforma en:

$$\frac{d}{dz}(v^2) - 2p_0v^2 = -2z \quad (16)$$

En tal caso, la solución de esta ecuación lineal de primer orden es:

$$v^2 = \frac{z}{p_0} + \frac{1}{2p_0^2} + Ce^{2p_0z} \quad (17)$$

La constante de integración C puede evaluarse al considerar que cuando $z=z_m$? $v=0$, entonces:

$$C = -\frac{z_m}{p_0} - e^{2p_0z_m} \quad (18)$$

De este modo, la solución es:

$$v^2 = \frac{z}{p_0} + \frac{1}{2p_0^2} - \left(\frac{z_m}{p_0} + e^{2p_0z_m}\right)e^{2p_0z} \quad (19)$$

La inercia máxima se alcanza cuando la velocidad en el túnel en dirección hacia el embalse es máxima, entonces a partir de la ecuación (19), se obtiene el valor que le corresponde al nivel de la chimenea en tal condición.

Si z_c es el valor del nivel de la chimenea en el instante de inercia máxima, entonces al determinar el valor extremo de la ecuación (19) se tiene que:

$$\frac{1}{2p_0^2} = \left(\frac{z_m}{p_0} + \frac{1}{2p_0^2}\right)e^{-2p_0z_m} e^{2p_0z_c} \quad (20)$$

O bien:

$$z_c = z_m - \frac{1}{2p_0} \ln(2p_0z_m + 1) \quad (21)$$

Al considerar la ecuación (15) el valor de z_c puede escribirse también como:

$$z_c = \frac{1}{2p_0} \ln\left(\frac{1}{1 - 4p_0^2z_m^2}\right) - p_0 \quad (22)$$

Es importante notar que $z_c > 0$ y su valor depende de p_0 . También es interesante observar que cuando la pérdida de carga se reduce, el valor de z_c se reduce. En el límite:

$$\lim_{p_0 \rightarrow 0} z_c = 0 \quad (22)$$

lo cual es coincidente con el comportamiento del sistema en ausencia de fricción.

Como este valor de z_c corresponde al de máxima velocidad e inercia, en el intervalo $(-z_c, z_c)$ la velocidad no difiere mucho. Este intervalo corresponde a una zona donde la chimenea reacciona más lentamente ante cambios externos. Así en el intervalo:

$$\left[-z_m + \frac{1}{2p_0} \ln(2p_0 z_m + 1), z_m - \frac{1}{2p_0} \ln(2p_0 z_m + 1) \right] \quad (23)$$

Es esperable que si en un punto dentro de ese intervalo se realiza la reconexión de carga, la oscilación resultante en la chimenea producirá los niveles mínimos en ella. El cálculo exacto del instante de reconexión crítica debe considerar la integración de las ecuaciones con una ley tipo $q = \mu(t - T_c)q(t)$ donde T_c es el instante de la reconexión.

3. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO: CENTRAL RALCO

3.1 Descripción

La central hidroeléctrica Ralco, de ENDESA S.A., aprovecha los recursos del río Bío-Bío existentes aguas arriba de la central Pangué. Con una bocatoma de reja tipo canastillo, ubicada en la cota 667,30 msnm, se captan las aguas del río Bío-Bío para luego ser conducidas por un túnel circular, revestido, en presión, de 9,20 m de diámetro y de 7165 m de longitud hasta la conexión con la chimenea de equilibrio, a la cota 660.30 msnm (eje del túnel). Desde la chimenea de equilibrio, se desarrolla un tramo en pendiente de 31 m de longitud y un tramo horizontal de 49 m de longitud hasta el comienzo de una curva vertical superior (de 90°), todos en sección revestida de 9,20 m de diámetro. Esta curva conduce al pique en presión de 55,60 m y luego a una curva vertical inferior (de 90°), que termina en un tramo de túnel de 47,7 m de longitud. Las curvas, el pique vertical y el último tramo, son todos de sección revestida (con hormigón armado) y de 9,20 m de diámetro. Desde este túnel inferior, en la cota 537,70 msnm (eje del túnel), nacen dos túneles blindados, de 5,50 m de diámetro, que alimentan a dos turbinas tipo Francis. El eje de la tubería en la entrada a las turbinas se encuentra a la cota 519,20 msnm.

La chimenea de equilibrio proyectada para la central Ralco es una chimenea abierta, con orificio, de sección constante circular de 24,50 m de diámetro. Su base se encuentra a la cota 660,30 msnm y está conectada a la aducción por medio de un orificio de 5,00 m de diámetro y 9,70 m de longitud.

3.2 Modelación numérica.

El análisis de los distintos estados de desequilibrio dinámico en el sistema Central Ralco se efectuaron en forma rigurosa utilizando las ecuaciones diferenciales parciales 1D de 2° orden y del tipo hiperbólico (modelo elástico) que rigen la evolución del caudal y cota piezométrica en la conducción. La resolución se efectuó considerando un análisis numérico bajo una discretización de diferencias finitas. El modelo numérico incorpora todas las singularidades del sistema.

Los parámetros básicos utilizados fueron los siguientes:

Cota Embalse : 700 m (Nivel arbitrario y menor que el normal de operación)
 Gasto inicial : 2 Unidades con 206.5 m³/s cada una. (100 % apertura)

Gasto final	= 0 m ³ /s.
Tiempo de cierre T	= 8 s.
Instante de reconexión	: t=Tc (variable)
Caudal de reconexión	: 50% de carga de una unidad en 8 s.
Pérdida túnel	: 17.7 m para Q= 2×206.5 m ³ /s
Pérdida orificio chimenea	: 20 m para Q= 2×206.5 m ³ /s

3.3 Resultados obtenidos

Para la condición inicial indicada en 3.2, se efectuaron rechazos totales de carga seguidos de tomas de cargas (o reconexiones) en diferentes instantes. Al respecto, se pudo observar que el nivel más crítico en la chimenea no se produce cuando la reconexión se efectúa en el instante que corresponde al nivel mínimo de la chimenea. Es más, una reconexión coincidente con el punto más alto de la chimenea es, en este caso, más desfavorable.

En los Gráficos 1 y 2 se observan las evoluciones temporales de la chimenea de equilibrio al efectuar una reconexión en el nivel mínimo y máximo de la chimenea respectivamente.

Gráfico N°1

Rechazo total de carga 2 Unidades en T=8 s
 Reconexión en nivel mínimo (368 s)
 Cota embalse = 700 m

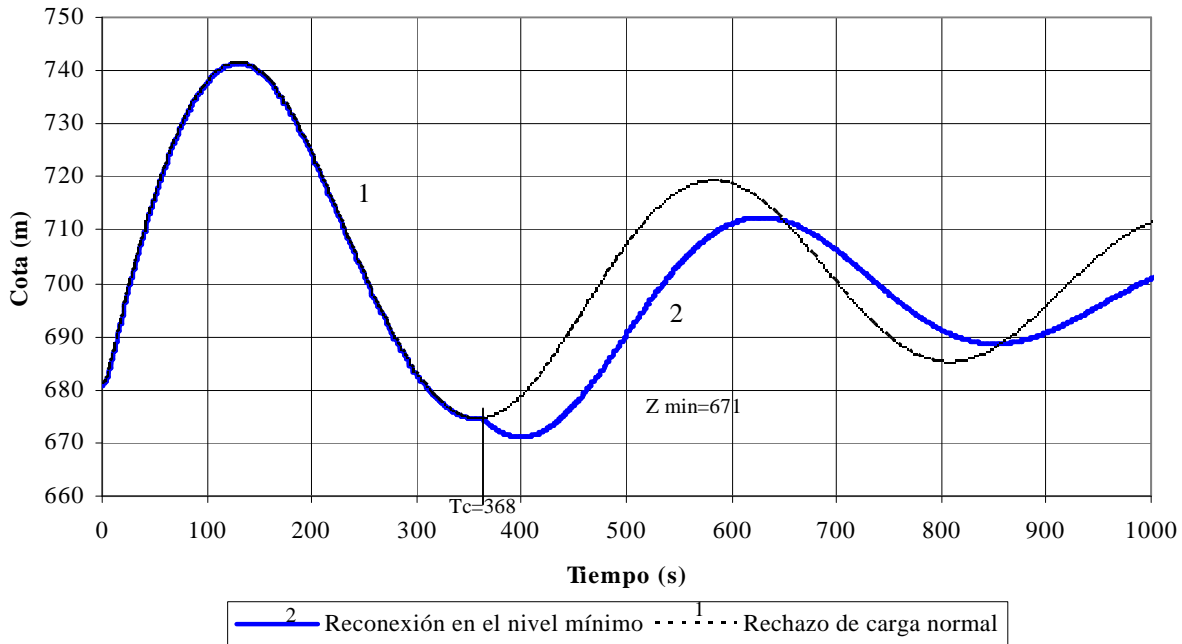
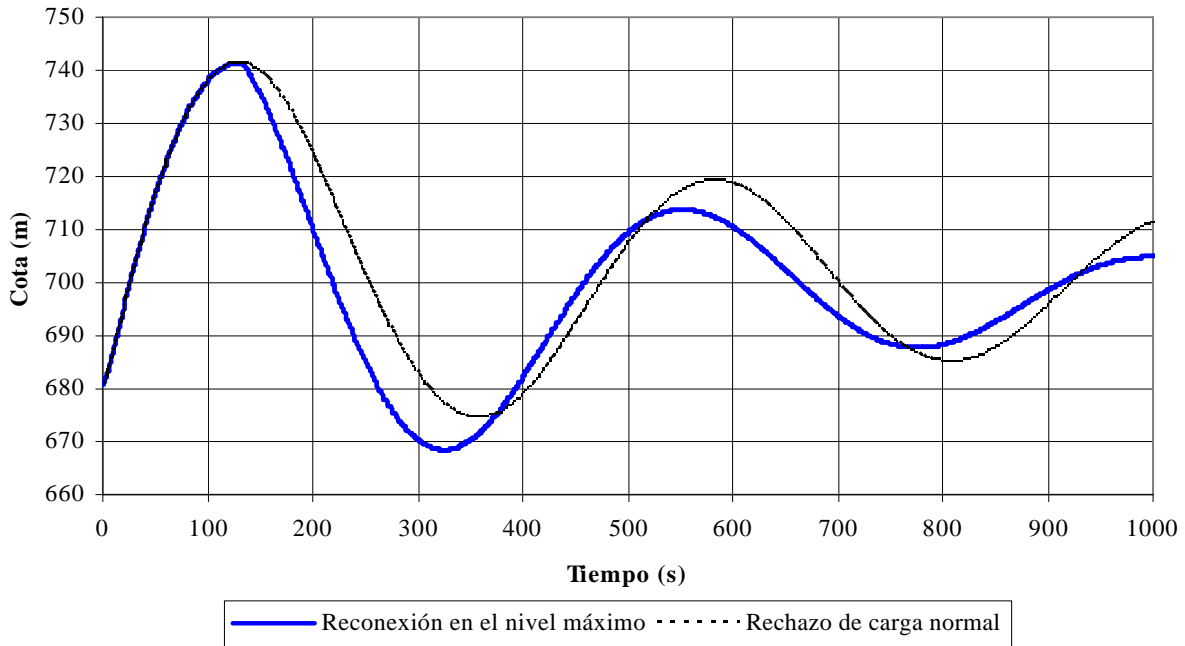


Gráfico N°2

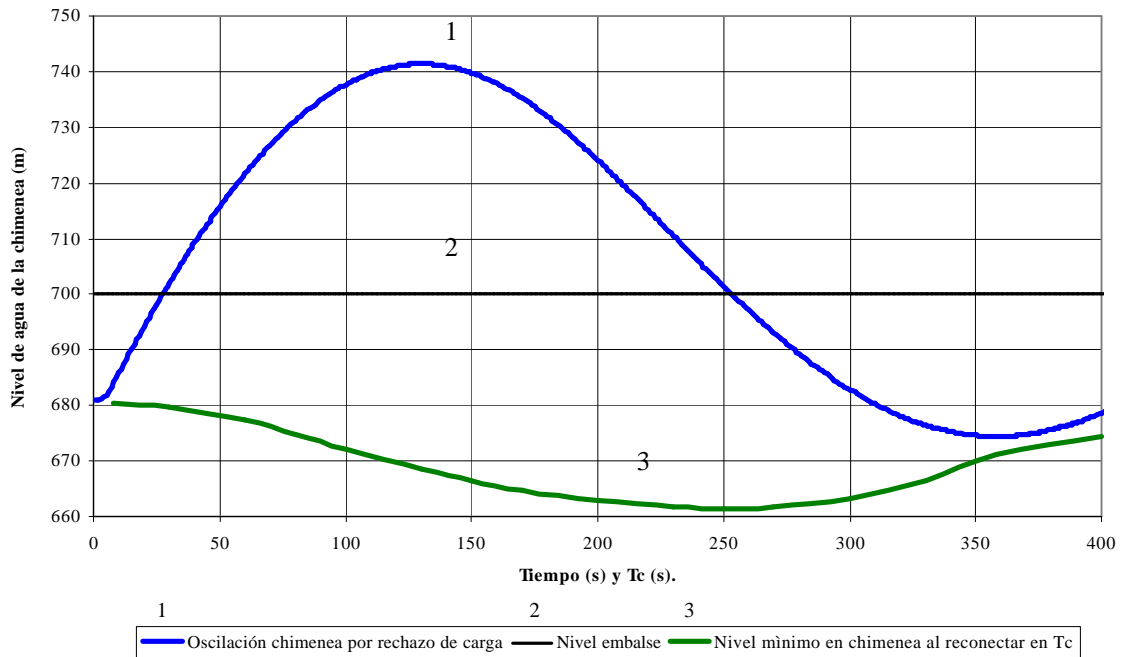
Rechazo total de carga 2 Unidades en T=8 s
 Reconexión en nivel máximo (130 s)
 Cota embalse = 700 m



Al graficar (Tc) los niveles mínimos que se obtienen en la chimenea para diferentes tiempos de reconexión, se obtiene el comportamiento que se aprecia en el Gráfico 3.

Gráfico N°3

Rechazo total de carga 2 Unidades en T=8 s.
 Reconexión en Tc (50% carga de 1 unidad)
 Cota embalse = 700 m



Por simple inspección de los datos del Gráfico 3, se puede apreciar que la máxima demanda de caudal hacia el túnel, durante la fase de descenso de la chimenea, se produce cuando el nivel de la chimenea (z_c) se ubica a 10.50 m sobre el nivel de embalse. Además se puede apreciar que el nivel más crítico de la chimenea (nivel mínimo) se produce cuando la reconexión se efectúa cuando el nivel en la chimenea prácticamente coincide con el nivel del embalse.

A partir del análisis efectuado en el punto 2, se tiene que para el caso de la Central Ralco:

$$Z^*=61.10 \text{ m,}$$

$$p_0=0.618,$$

$$z_m=0.638 \text{ y}$$

$$z_c = \frac{1}{2p_0} \ln \left(\frac{1}{1 - 4p_0^2 z_m^2} \right) - p_0 = 0.168$$

y por tanto $Z_c = z_c \times Z^* = 10.23$ m. Valor que prácticamente coincide con el determinado por el modelo numérico (10.50 m).

Además, en la expresión (23) se indica que el punto crítico de reconexión debiera producirse cuando la chimenea, durante la fase de descenso, alcanza un nivel z_c dentro del intervalo (-0.168, 0.168). En el caso de Ralco este nivel z_c es prácticamente 0.

El punto de inercia máxima en el túnel, durante la fase de descenso de nivel en la chimenea, y el instante de reconexión son cruciales para determinar el nivel mínimo en la chimenea. En efecto, si la reconexión se efectúa en un tiempo coincidente con el nivel mínimo de la chimenea, posterior al rechazo de carga, se alcanza un nuevo mínimo de $Z = -28.88$ m. Si la reconexión se produce en el instante en que se alcanza el máximo nivel en la chimenea, posterior al rechazo de carga, se obtiene un mínimo relativo en la chimenea de $Z = -31.53$ m. Pero si la reconexión se produce en el instante crítico T_c correspondiente al punto crítico, se alcanza un nivel mínimo en la chimenea de $Z = -38.63$ m.

Este último punto es absolutamente relevante cuando se efectúan reconexiones que requieran poco tiempo de espera y en el que el sistema tenga niveles de embalse bajos. En tal caso si no se determina el tiempo de reconexión en forma certera, se pueden producir colapsos por cavitación debido a puntos singulares en la aducción (puntos locales altos) o vaciamientos no esperados en la chimenea de equilibrio.

4. CONCLUSIONES

El tiempo crítico de reconexión de una unidad que produce los niveles mínimos en la chimenea, posterior a un rechazo total de carga, no se produce en el instante correspondiente al nivel mínimo en la chimenea ni al correspondiente al nivel máximo posterior a un rechazo. La reconexión crítica se produce cerca del instante de inercia máxima en el túnel. Esto es explicable por la magnitud de la inercia del flujo en el túnel y por la dirección del flujo desde la chimenea hacia el embalse.

Si bien una reconexión en el nivel mínimo de la chimenea puede ser intuitivamente más crítico, hay que notar que ese instante corresponde a aquel en que el túnel comienza a aportar caudal a la chimenea y por consiguiente no debiera ser crítico.

La deducción del nivel de chimenea z_c correspondiente al de máxima inercia, es un indicador del intervalo en que se encuentra el instante crítico de reconexión.

Para el caso específico de la Central Ralco, el efectuar una reconexión en el punto crítico implica un nivel mínimo relativo en la chimenea de $Z=-38.63$ m, mucho menor que efectuar una reconexión en el instante correspondiente al de menor nivel en la chimenea, en la que se alcanza un valor relativo mínimo de $Z=-28.88$ m. La gran diferencia que se produce en el nivel relativo mínimo puede implicar cavitación en el túnel o bien puede producir vaciamiento de la chimenea.

REFERENCIAS

Abreu, Guarda e Izquierdo, 1994. Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión.

Chamorro, L. y Guarda J. 2000. Diseño de Chimeneas de Equilibrio Cerradas en Centrales Hidroeléctricas. Aplicación a un caso Práctico. XV Congreso Chileno de Hidráulica.

Chaudhry, M. 1979. Applied Hydraulic Transients.

Neger R, 2000. Central Ralco. Diseño básico aducción. INGENDESA S.A.