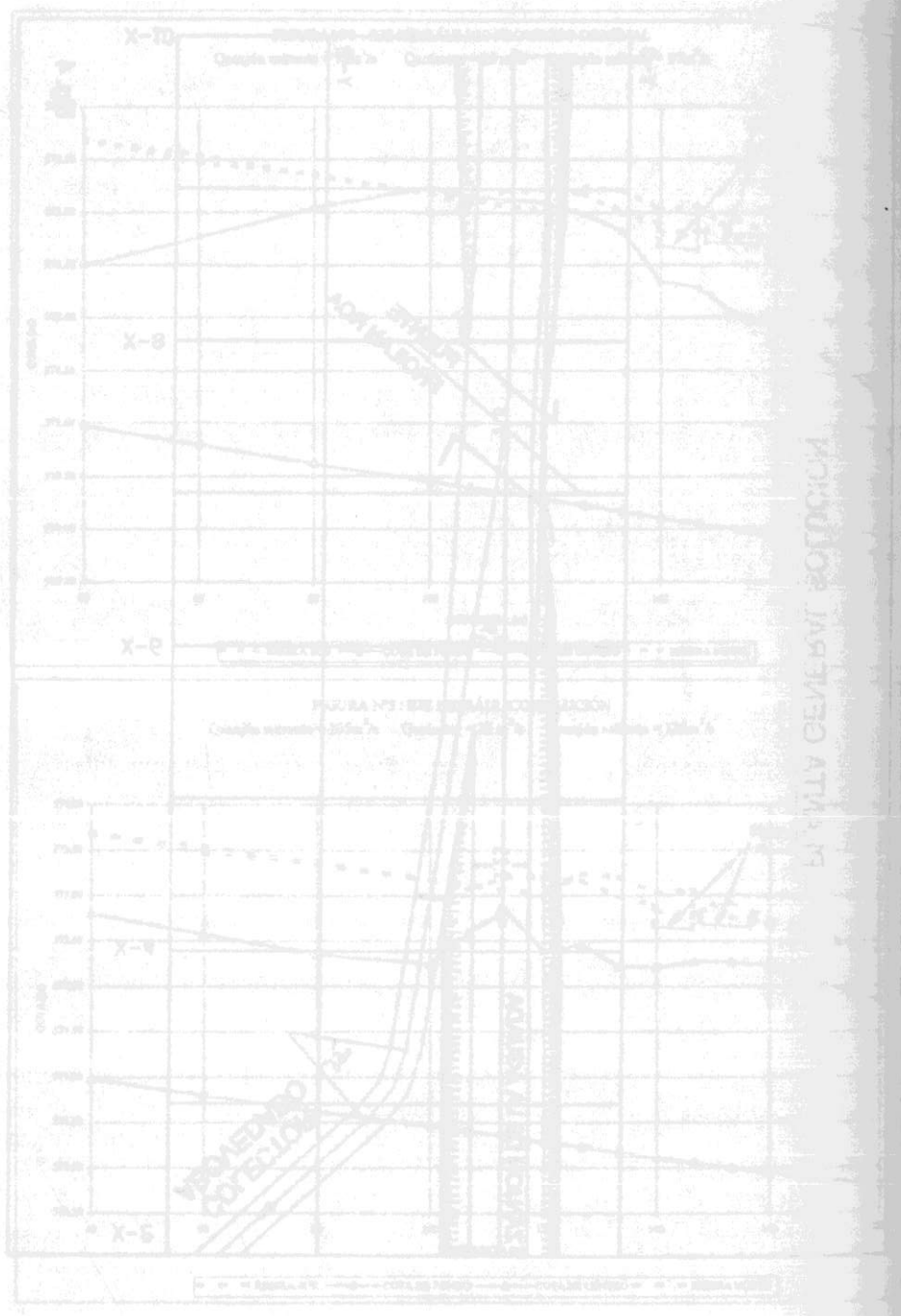


SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

DISEÑO DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CERRADAS EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

LEONARDO CHAMORRO CH.[1]
JORGE GUARDA A.[2]

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la descripción y el manejo de las herramientas teóricas necesarias para el dimensionamiento de chimeneas de equilibrio cerradas en centrales hidroeléctricas, el análisis básico del comportamiento de las distintas variables que intervienen en su dimensionamiento y estudiar su aplicación al caso específico de la central Ralco.

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 ha elaborado un modelo numérico que permite determinar el comportamiento de las chimeneas cerradas frente a maniobras de los equipos de generación.

Aplicando el programa computacional al caso de la central Ralco, se han podido desarrollar criterios y procedimientos básicos para el dimensionamiento de una chimenea de equilibrio cerrada. A partir de esto, se han definido las principales variables de diseño como el volumen, la presión inicial del aire en la chimenea y la altura media de la misma.

[1] Ingeniero Civil de INGENDESA S.A. y Académico de la Escuela de Ingeniería, U. de Chile.
[2] Memorista U. de Chile (2000)

1. MODELO PARA CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CERRADAS

1.1 Geometría y variables del problema

El esquema general de una aducción en presión con chimenea de equilibrio cerrada se muestra en la Figura N°1, donde además se definen las variables relevantes del problema.

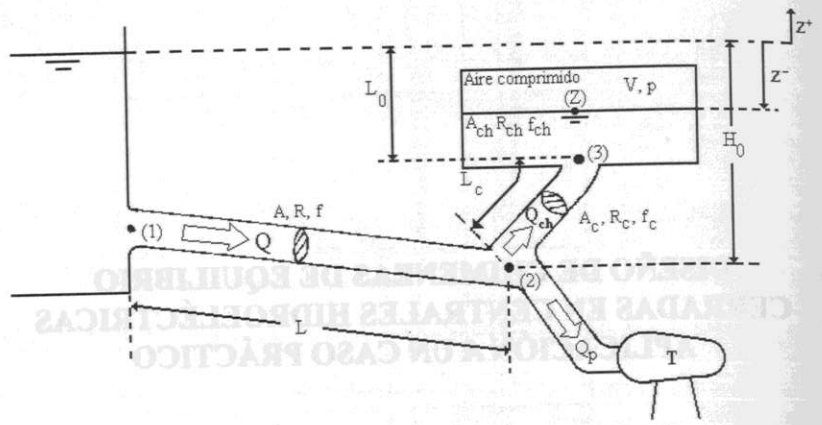


Figura N°1. Geometría característica de una aducción en presión con chimenea de equilibrio cerrada y variables relevantes del problema.

1.2 Desarrollo de las ecuaciones

Con el objeto de determinar la variación de z y Q en el tiempo, se aplica la ecuación de Euler entre el embalse o cámara de carga (1) y la confluencia de la aducción con la chimenea y el pique forzado (2), con lo que se tiene:

$$\frac{L}{g}\frac{dU}{dt} + B_2 - B_1 + k_{02}\frac{U|U|}{2g} = 0 \qquad (1)$$

Donde k_{02} es el coeficiente de pérdidas friccionales y singulares en el tramo (1)→(2). Considerando un nivel de referencia cero en (2) y que el nivel del embalse es constante, se tiene que $B_1 = H_0$. Análogamente para el conducto que une a la chimenea con la aducción (2)→(3):

$$\frac{L_c}{g}\frac{dU_c}{dt} + B_3 - B_2 + k_{23}\frac{U_c|U_c|}{2g} = 0 \qquad (2)$$

Donde k_{23} es el coeficiente de pérdidas friccionales y singulares en el tramo (2)→(3). El coeficiente k_{23} es de gran importancia, ya que puede incluir las pérdidas ocasionadas por el orificio, en el caso que se utilice una chimenea de este tipo. Finalmente, aplicando la ecuación de Euler en la chimenea, (3)→(Z):

$$\frac{L_0 + z}{g}\frac{dU_{ch}}{dt} + B_z - B_3 + k_{3z}\frac{U_{ch}|U_{ch}|}{2g} = 0 \qquad (3)$$

Donde k_{3Z} es el coeficiente de pérdidas friccionales y singulares dentro de la chimenea.

En la Figura N°1 se muestran las direcciones para las cuales se consideran positivos los caudales de la aducción, Q, el caudal entrante a la chimenea, Q_{ch}, y el caudal que pasa a las turbinas, Q_p.

Sumando las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtiene finalmente:

$$\frac{L}{g}\frac{dU}{dt} + \frac{L_c}{g}\frac{dU_c}{dt} + \frac{L_0 + z}{g}\frac{dU_{ch}}{dt} + B_z - B_1 + k_{02}\frac{U|U|}{2g} + k_{23}\frac{U_c|U_c|}{2g} + k_{3z}\frac{U_{ch}|U_{ch}|}{2g} = 0 \qquad (4)$$

Si se analizan las magnitudes de los distintos parámetros geométricos se pueden hacer varias simplificaciones a la ecuación (4).

En la mayoría de los casos, se tiene que $L >> L_c$ y $L >> L_0 + z$, por lo que se pueden despreciar los términos asociados a la inercia de la columna de agua tanto de la chimenea como de la conexión con la aducción.

Dado que el área de la chimenea es generalmente mucho mayor que la de la aducción, $U >> U_{ch}$, se puede ignorar el término de la altura de velocidad en (Z). Considerando además que el aire en la chimenea se encuentra a una presión relativa p y que g es el peso específico del agua, el Bernoulli en (Z) está dado por: $B_z = H_0 + z + p/\gamma$.

Finalmente, y por las mismas razones destacadas en los dos puntos anteriores, se pueden despreciar las pérdidas friccionales dentro de la chimenea.

Con estas simplificaciones e introduciendo los valores de B_1 y B_z, la ecuación (4) se reduce a:

$$\frac{L}{g}\frac{dU}{dt} + z + \frac{p}{\gamma} + k_{02}\frac{U|U|}{2g} + k_{23}\frac{U_c|U_c|}{2g} = 0 \qquad (5)$$

De la ecuación de continuidad en la conexión de la chimenea con la aducción se tiene que:

$$Q_C = Q_{CH} = Q - Q_P \qquad (6)$$

Donde Q_p, el caudal que pasa a las turbinas, es modelado como una función del tiempo y depende del tipo de maniobra que se realiza. Además, si se considera una sección transversal constante para la chimenea:

$$A_{Ch}\frac{dz}{dt} = Q - Q_P \qquad (7)$$

Finalmente, reemplazando (6) en (5) y expresando la ecuación resultante en términos de caudales:

$$\frac{L}{Ag}\frac{dQ}{dt} + z + \frac{p}{\gamma} + kaQ|Q| + kc(Q - Q_P)|Q - Q_P| = 0 \qquad (8)$$

Donde ka es el coeficiente de pérdidas en el túnel de aducción y kc en la conexión de la chimenea con la aducción (orificio), los que están dados por:

$$ka = \frac{k_{02}}{A^2} \text{ y } kc = \frac{k_{23}}{A_C^2} \qquad (9)$$

La presión relativa al interior de la cámara (p) se puede relacionar con el volumen de aire en su interior por medio de la relación politrópica: $(p + p_a)V^r = (p_0 + p_a)V_0^r = Cte$, donde p_a es la presión atmosférica, y son los valores iniciales de la presión y el volumen de aire dentro de la cámara, respectivamente, asociados al régimen permanente inicial. La constante politrópica, r, depende del tipo de proceso al cual está sometido el gas (1,0 si el proceso es isotérmico y 1,4 si es adiabático).

Además, de la geometría de la chimenea se tiene que:

$$V = V_0 + A_{ch}(z_0 - z) \qquad (10)$$

Donde z_0 es el nivel inicial asociado al régimen permanente inicial.

Reemplazando y ordenando se tiene el sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} Q \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{Ag}{L}\left(z + \left(\frac{p_0}{\gamma} + \frac{p_a}{\gamma}\right)\left(1 + \frac{A_{Ch}}{V_0}(z_0 - z)\right)^{-r} - \frac{p_a}{\gamma} + kaQ|Q| + kc(Q - Q_P)|Q - Q_P|\right) \\ \frac{Q - Q_P}{A_{Ch}} \end{pmatrix} \qquad (11)$$

1.3 Resolución – Modelo numérico

Para resolver numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan el escurrimiento transitorio, se ha considerado el método de Runge–Kutta de cuarto orden. El modelo numérico fue realizado ocupando el programa MATLAB, cuyo detalle puede apreciarse en Chamorro y Guarda (2000).

1.4 Parámetros del modelo

El modelo desarrollado requiere las siguientes variables y parámetros:

- Condiciones iniciales (régimen permanente)

$Q(t = 0) = Q_0$ = caudal de generación en régimen permanente (m^3/s).

Por su parte, el nivel en la chimenea de equilibrio (z_0) se relaciona con la presión inicial (p_0) y la pérdida de carga en la aducción mediante la siguiente ecuación, de donde se obtiene la segunda condición inicial:

$z(t = 0) = z_0 = -P_0/\gamma - kaQ_0|Q_0|$ (m) = nivel de aguas inicial en la chimenea cerrada.

- Características de la aducción de la central

L: Longitud de la aducción (m).
A: Área de la aducción (m^2).
ka: Factor que considera las pérdidas en la aducción ($m/(m^3/s)^2$).

- Características de la chimenea

A_{ch}: Área transversal de la chimenea (m^2).
kc: Factor que considera las pérdidas de entrada y/o salida en la chimenea ($m/(m^3/s)^2$).
V_0: Volumen inicial de aire en la chimenea de equilibrio(m^3).
p_a: Presión atmosférica (m).
r: exponente de evolución politrópica del aire.

Los parámetros V_0 y A_{ch} se pueden combinar para formar un nuevo parámetro que puede denominarse altura media de cámara, $Ha = V_0/A_{ch}$. Por lo tanto, el volumen inicial de aire, V_0, y la altura media de cámara, Ha, son variables de diseño de la chimenea de equilibrio, ya que están ligadas a la forma y tamaño de la misma.

- Caudal turbinado

La variación del caudal turbinado puede relacionarse con la evolución de los transientes "rápidos" entre la turbina y la chimenea (golpe de ariete). Estos podrían ser resueltos numéricamente con el modelo elástico, pero como las oscilaciones de la chimenea son un proceso mucho más lento, y que generalmente tiene un área superficial mucho mayor que la de la aducción, se puede despreciar su efecto en la variación de la superficie libre de la chimenea, representando "un ruido" en la evolución global. Lo anterior permite suponer que al abrir o cerrar la turbina, el caudal turbinado varía linealmente en el tiempo. Ello permite adoptar la siguiente ley: $Q_p = Q_0 - (Q_0 - Q_f)\cdot(t / T_c)$ (m^3/s), donde T_c es el tiempo de cierre o de apertura de la turbina de la central (s) y Q_f es el caudal final turbinado después de la maniobra (m^3/s).

2. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO: CENTRAL RALCO

2.1 Descripción

La central hidroeléctrica Ralco, proyecto de ENDESA S.A., aprovecha los recursos del río Bío-Bío existentes aguas arriba de la central Pangue. Mediante una presa de hormigón rodillado se formará el embalse Ralco. 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, de aproximadamente 7 km de longitud hasta la conexión con la chimenea de equilibrio, a la cota 643,60 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 47,68 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.

2.2 Parámetros utilizados en el modelo

A continuación se presentan los valores de los parámetros y variables asociados a cada maniobra de diseño, con las que se hace el diseño preliminar de la chimenea de equilibrio cerrada.

MANIOBRA	Rechazo total de carga de ambas unidades	Toma de carga de una unidad con la segunda anclada en plena carga
PARAMETROS DEL MODELO		
GASTO INICIAL	$Q_0 = 454\ (m^3/s)$	$Q_0 = 238{,}87\ (m^3/s)$
GASTO FINAL	$Q_f = 0\ (m^3/s)$	$Q_f = 409{,}19\ (m^3/s)$
TIEMPO DE CIERRE	$T_c = 8$ (s)	$T_c = 7{,}6$ (s)
COTA EMBALSE	E = 725 (msnm)	E = 692 (msnm)
TÚNEL DE ADUCCIÓN		
Longitud	L = 7.165 (m)	L = 7.165 (m)
Diámetro	D = 9,20 (m)	D = 9,20 (m)
Área	$A = 66{,}476\ (m^2)$	$A = 66{,}476\ (m^2)$
Rugosidad (Coef. de Manning)	n = 0,0115	n = 0,0135
Coef. de pérdida en el túnel	$ka = 0{,}5103 \cdot n^2 + 0{,}000015\ (m/(m^3/s)^2)$	$ka = 0{,}5103 \cdot n^2 + 0{,}000015\ (m/(m^3/s)^2)$
Pérdida total para $Q_0 = 454\ m^3/s$	$ka \cdot Q_0^2 = 17{,}0$ (m)	$ka \cdot Q_0^2 = 6{,}162$ (m)
ORIFICIO		
Coef. de pérdida ascendente	$koa = 0{,}0001081\ (m/(m^3/s)^2)$	$koa = 0{,}0001081\ (m/(m^3/s)^2)$
Coef. de pérdida descendente	$kod = 0{,}0001373\ (m/(m^3/s)^2)$	$kod = 0{,}0001373\ (m/(m^3/s)^2)$
CHIMENEA		
Volumen de aire	V_0 = Variable (m^3)	V_0 = Variable (m^3)
Altura media de cámara	$Ha = V_0/Ach$ = Variable (m)	$Ha = V_0/Ach$ = Variable (m)
Presión atmosférica	p_a/γ = 10,00 (mca)	p_a/γ = 10,00 (mca)
Presión inicial en la cámara	p_0/γ = Variable (mca)	p_0/γ = Variable (mca)
Coef. Politrópico	r = 1,2	r = 1,2
NIVEL DE REFERENCIA: DISEÑO ACTUAL DE LA CENTRAL RALCO	$E + z_{máx} = 772{,}41$ (m)	

2.3 Consideraciones de diseño

Se considera como la presión máxima de diseño al nivel piezométrico máximo alcanzado por la chimenea abierta (diseño actual), que asciende a 772,41 msnm.

Presión atmosférica: $P_0/\gamma = 10$ mca y exponente politrópico: r = 1,2.

2.4 Resultados obtenidos

Se hicieron análisis considerando distintos valores de $Ha = V_0/A_{ch}$, en un rango comprendido entre 25 m y 100 m. Para cada uno de estos valores de Ha se modeló el comportamiento de la chimenea, en la maniobra de rechazo de carga, para presiones iniciales entre 0 y 140 mca y volúmenes iniciales de aire entre 65.000 y 160.000 m^3, registrándose en cada ocasión los desniveles y las presiones máximas y mínimas que se alcanzan en la chimenea, y el momento en que éstas ocurren.

De los procesos realizados pudo verse, como se esperaba, que la presencia de un orificio en la chimenea cerrada logra un amortiguamiento más rápido de las oscilaciones y un menor volumen total. Esto puede apreciarse en el gráfico N°1 que muestra una situación arbitraria.

También a modo de ejemplo, en los gráficos N°2 y N°3 se muestra la variación de las sobrepresiones máximas, $(z + p/\gamma)$, en función de $1/V_0$, para distintas combinaciones de Ha y

p_0. La razón para graficar en función de $1/V_0$ es que, de esta manera, las relaciones entre las variables pueden modelarse adecuadamente como rectas. Es decir, las sobrepresiones máximas tienen un comportamiento lineal con respecto al inverso del volumen de aire en la chimenea.

Gráfico N°1

Evolución temporal de las cotas piezométricas para la chimenea abierta (diseño actual de la central) v/s chimeneas cerradas con y sin orificio (p_0/γ = 55 m Ha = 7,5 m)

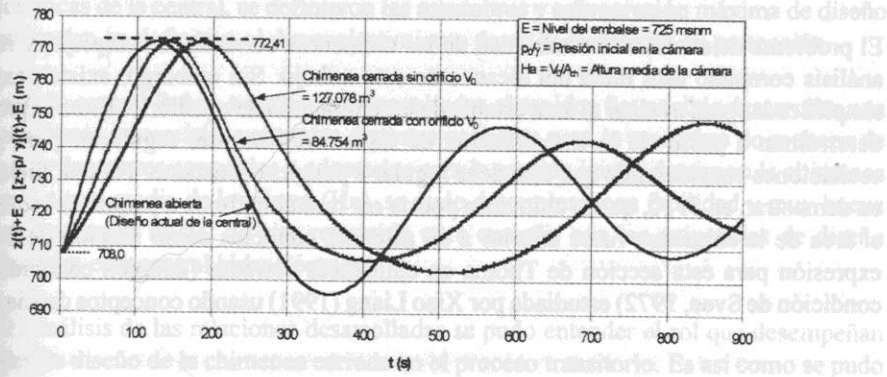


Gráfico N°2

$(z+p/\gamma)_{máx}$ en función de p_0/γ y $1/V_0$ para Ha = 25 m

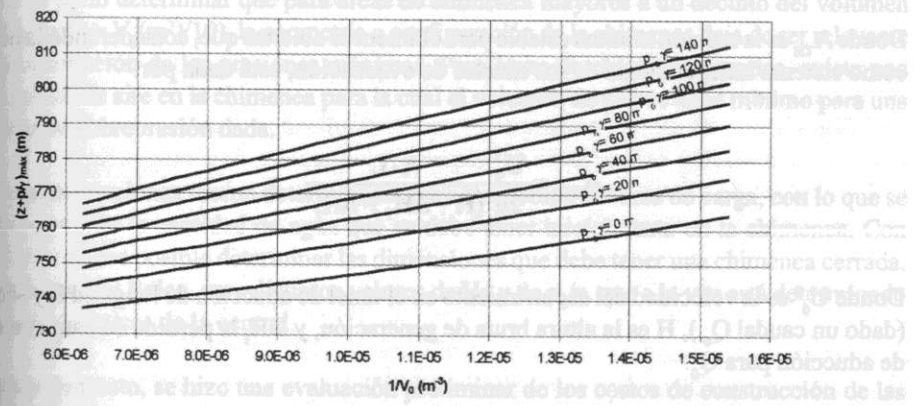
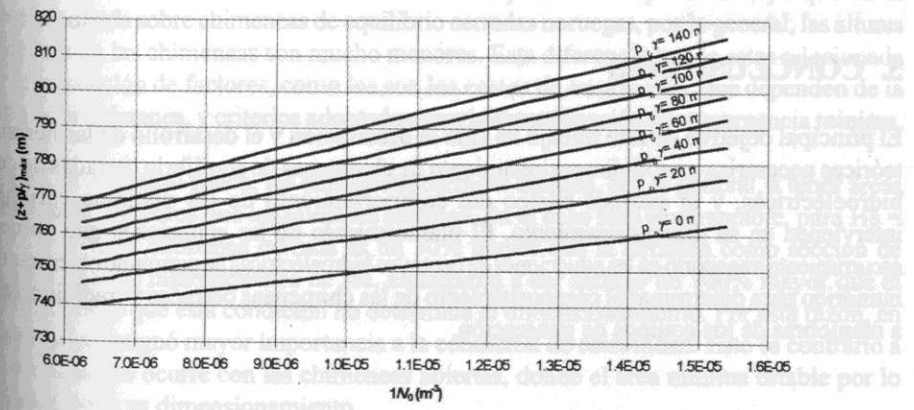


Gráfico N°3

$(z+p/\gamma)_{máx}$ en función de p_0/γ y $1/V_0$ para Ha = 50 m



A partir de una serie de relaciones que con variables redefinidas como $1/V_0$ resultan ser también lineales, como las mencionadas, $V_{\text{inicial de aire}}=f(p_0/\gamma)_{Ha=cte}$, $Z_{min}-Z_0=f(1/V_0)_{po/\gamma=cte}$, entre otras, es posible determinar fácilmente el óptimo para la chimenea cerrada considerando las restricciones de presión máximas dadas.

3. CONDICIÓN DE ÁREA MÍNIMA ESTABLE

El problema de analizar la estabilidad de las chimeneas cerradas es complejo, y realizar un análisis completo esta fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, existen expresiones se simplificadas para evaluar el área estable de las chimeneas de equilibrio. Estas expresiones se determinan a partir de la linealización de las ecuaciones del regulador para pequeñas oscilaciones considerando que éste debe regular a potencia constante. Thoma, fue el primero en demostrar, en 1910, que la chimenea podría ser inestable frente a pequeñas oscilaciones si el área de la chimenea fuese inferior a un mínimo, conocida como sección de Thoma. La expresión para esta sección de Thoma en chimeneas cerradas (también conocida como la condición de Svee, 1972) estudiada por Xiao Liang (1991) usando conceptos de Liapunov, es:

$$\frac{1}{A_{ES}} = \frac{1}{A_{TH}} - \frac{r\left(\frac{p_0}{\gamma}+\frac{p_a}{\gamma}\right)}{V_0} \qquad (12)$$

Donde A_{TH} es la sección mínima estable para chimeneas abiertas que, considerando la aducción como sistema independiente de los túneles de evacuación, está dada por:

$$A_{TH} = \frac{U_0^2}{2g}\frac{A\cdot L}{(H-\Delta H_f)\cdot \Delta H_f} \qquad (13)$$

Donde U_0^2 es la velocidad del escurrimiento en el túnel de aducción de longitud L y sección A (dado un caudal Q_0), H es la altura bruta de generación, y DH_f la pérdida de carga en el túnel de aducción para Q_0.

Todas las posibles chimeneas cerradas estudiadas, cumplen con creces la condición de área mínima estable, a pesar de que la condición planteada es una estimación que está muy por el lado de la seguridad

5. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo ha sido la descripción y el desarrollo de las herramientas teóricas necesarias para el dimensionamiento de chimeneas de equilibrio cerradas de centrales hidroeléctricas, y el análisis básico del comportamiento de las distintas variables que intervienen en su dimensionamiento. El planteamiento de las ecuaciones que gobiernan el escurrimiento transitorio en las aducciones de centrales hidroeléctricas ha permitido obtener un modelo numérico para determinar el comportamiento de las chimeneas cerradas y tradicionales frente a maniobras de los equipos de generación.

Mediante la aplicación del modelo computacional al caso específico de la aducción de la central Ralco, se han podido desarrollar criterios y procedimientos básicos para el dimensionamiento de una chimenea de equilibrio cerrada.

En las primeras etapas de este estudio, se eligió trabajar con el parámetro definido como la altura media de aire en la chimenea (Ha), que no es más que la relación entre el volumen inicial de aire dentro de la chimenea (V_0) y el área transversal de la misma (A_{ch}). Luego, dadas las características de la central, se definieron las maniobras y sobrepresión máxima de diseño que determinarían en definitiva el dimensionamiento de estos elementos de protección.

En el caso de la central Ralco, a partir de los resultados obtenidos fue posible desarrollar una serie de relaciones matemáticas entre las distintas variables para la maniobra de rechazo de carga. A partir de valores conocidos o adoptados para la presión inicial de aire en la chimenea (p_0/γ) y de la altura media de la misma (Ha), se pudo determinar, con facilidad y muy buena precisión, el volumen inicial de aire requerido para cumplir con las exigencias de diseño establecidas para esta central hidroeléctrica.

A partir del análisis de las relaciones desarrolladas se pudo entender el rol que desempeñan las variables de diseño de la chimenea cerrada en el proceso transitorio. Es así como se pudo determinar que la presión máxima depende directamente del inverso del volumen de aire o, lo que es lo mismo, que el volumen de aire presenta un comportamiento hiperbólico para las presiones máximas.

También se pudo determinar que para áreas de chimenea mayores a un décimo del volumen de aire ($A_{ch}(m^2) > V_0(m^3)/10$), la geometría o configuración de la chimenea deja de ser relevante en la determinación de las presiones máximas. Para áreas de chimenea grandes, existe una presión inicial de aire en la chimenea para la cual el volumen de aire se hace mínimo para una restricción de sobrepresión dada.

Estas mismas relaciones fueron determinadas para maniobras de toma de carga, con lo que se logró dimensionar la cantidad de agua que se debe tener inicialmente en la chimenea. Con estas relaciones fue posible determinar las dimensiones que debe tener una chimenea cerrada, apta para la central Ralco, para distintos valores de Ha y de p_0/γ, que a la vez está determinado por las características de la central.

Como complemento, se hizo una evaluación preliminar de los costos de construcción de las chimeneas cerradas para determinar cuál era el valor más apropiado del parámetro Ha. El resultado, para el caso de la central Ralco, fue que el diseño más económico, tanto en términos del volumen de la chimenea como de su costo, se logra al adoptar una altura media de aire en la chimenea del orden de 50 m. Este resultado no deja de ser sorprendente, ya que en la literatura consultada sobre chimeneas de equilibrio cerradas noruegas, por lo general, las alturas medias de aire en las chimeneas son mucho menores. Esta diferencia puede estar relacionada con una combinación de factores, como los son los costos de excavación, que dependen de la geometría de la chimenea, y criterios adoptados para la determinación de sumergencia mínima.

Para el caso de la central Ralco, las chimeneas cerradas tienden, por lo general, a tener áreas de diseño mucho mayores que las mínimas estables. En el caso más desfavorable, para Ha = 100 m, el área de la chimenea cerrada es un 30% mayor que la definida como sección de Thoma. Para valores más pequeños de Ha, alcanzaron a ser incluso un 100% mayor que el área mínima, por lo que esta condición no determina el dimensionamiento. Por está razón, en este estudio no se asignó mayor importancia a la condición de estabilidad. Esto es contrario a lo que generalmente ocurre con las chimeneas abiertas, donde el área mínima estable por lo general condiciona su dimensionamiento.

De la experiencia obtenida del dimensionamiento de la chimenea cerrada para la central Ralco se pueden hacer algunas observaciones generales.

Cuando la presión inicial a la que debe trabajar la chimenea cerrada aumenta, en virtud de un mayor desnivel entre su ubicación y el embalse, aumenta el volumen total de la chimenea.

A medida que se disminuye el valor de Ha, el volumen de las chimeneas tiende a ser menor, existiendo un comportamiento asintótico. Es decir, para valores muy pequeños de Ha, o áreas de chimenea muy grandes, el comportamiento de la chimenea, y por lo tanto, su dimensionamiento, se hace insensible frente a esta variable. Es más, si se plantea la necesidad de tener una altura mínima de agua en la chimenea, para prevenir el ingreso de aire a la aducción en las tomas de carga, para valores muy pequeños de Ha, el volumen total de la chimenea tiende a aumentar, lo que garantiza la existencia de un óptimo económico para Ha.

Cuando se tienen áreas de chimenea grandes y se fija su valor en el modelamiento, existe una presión óptima, distinta de cero, para la cual el volumen de aire necesario en la chimenea se hace mínimo.

En tomas de carga el descenso en el nivel de aguas aumenta en la medida que Ha crece. Este resultado es el esperado, ya que para mayores valores de Ha la chimenea tiende a ser de menor diámetro y, por lo tanto, requiere una mayor altura para entregar una misma cantidad de agua. Sin embargo, se observó que a medida que las presiones iniciales en la cámara disminuyen, los desniveles alcanzados son bastante mayores. Por lo tanto, al disminuir la presión de trabajo se tiende a compensar la disminución de volumen de aire inicial.

La chimenea de equilibrio cerrada diseñada para la aducción de la central Ralco, está lejos de ser una alternativa económica frente a la utilización de una chimenea de equilibrio abierta. Sin embargo, en este estudio no se analiza con profundidad la optimización del trazado de la aducción, la ubicación de la caverna de máquinas y los equipos de control, o las características de los equipos de generación. Es decir, en virtud de que las chimeneas cerradas permiten independizarse de la topografía del terreno donde se ubica la central, la optimización de estas otras variables puede significar ahorros significativos en otras áreas de la central.

Por lo tanto, el hecho de que para el caso de la central Ralco la chimenea cerrada no haya sido una alternativa económica no debe ser una motivación para descartar a priori la utilización de una chimenea cerrada en éste u otro proyecto hidroeléctrico. Por lo general, la conveniencia de utilizar chimeneas de equilibrio cerradas depende de las características topográficas y geológicas de la zona del proyecto, y de la optimización técnico – económica de todos los elementos de la central.

REFERENCIAS

Chamorro, L. y J. Guarda. 2000. "Diseño de Chimeneas de Equilibrio Cerradas en Centrales Hidroeléctricas: Aplicación a un Caso Práctico". Universidad de Chile.

Svee, R. 1972. "Surge chamber with an enclosed compressed air cushion". Proceedings of the International Conference on Pressure Surges, BHRA, September, pp. G2-15 – G2-24.

Xiao - Liang, Y. 1991. "Stability of Oscillations in Air Cushion Surge Chambers". Boletín N° TRITA-VBI-155, Royal Institute of Technology, Estocolmo.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCAVACIÓN EN TORNO A ESPIGONES: MÉTODOS DE CALCULO Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL

JORGE MOLINA A.[1]
ALEJANDRO LÓPEZ A.[2]

RESUMEN

Un aspecto de gran importancia en el diseño de espigones implantados en un cauce es la estimación de la magnitud de la socavación que se produce en el cabezo de esta estructura. Su determinación se realiza aplicando metodologías que, al no disponer de verificaciones en cauces de características diferentes a los que han servido para la formulación de tales modelos, pueden entregar resultados inciertos. Como un aporte a la discusión en este tema, se presenta la aplicación de algunas de las metodologías existentes a un sector del río Cachapoal y su verificación experimental en un modelo físico, comparándose los resultados correspondientes.