

Estudios en honor de
Francisco Javier Domínguez
AUCH, 5ª Serie, N° 8 (1985): 387-402

IMPORTANCIA DE LOS MODELOS REDUCIDOS PARA EL DISEÑO DE OBRAS HIDROELECTRICAS

GUSTAVO BENAVENTE Z.
ENDESA - Chile

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de modelos a escala reducida es uno de los métodos complementario a las normas y técnicas de proyecto para el análisis y diseño de las diversas estructuras que permiten el aprovechamiento de los recursos hidráulicos, así como para visualizar el comportamiento de cursos de agua.

La conveniencia de utilizar modelos para los estudios y proyectos hidráulicos es universalmente reconocida, especialmente cuando las obras que se diseñan involucran inversiones de consideración.

En nuestro país, el uso de modelos hidráulicos para fines de investigación ha sido ampliamente desarrollado desde hace muchos años gracias a la iniciativa y clara visión de eminentes profesores de hidráulica teórica. Los relativos al diseño específico de obras, aunque su empleo generalizado es de fecha más reciente que los de investigación, hoy día constituyen un elemento de análisis muy difundido y prácticamente ineludible para el diseño de estructuras importantes.

2. MODELOS HIDRÁULICOS PARA EL DISEÑO DE OBRAS HIDROELÉCTRICAS

2.1. *Consideraciones Generales*

Las obras hidroeléctricas se caracterizan por las fuertes inversiones que

exige su realización y el bajo costo posterior para su operación y mantenimiento. Estas dos condiciones conducen a la realización de un diseño estudiado en forma detallada que permita aprovechar lo más eficientemente posible la inversión correspondiente y de modo tal que no aparezcan posteriormente defectos y problemas de funcionamiento.

En el mismo sentido, la necesidad de que la puesta en servicio de las centrales hidroeléctricas sea oportuna y ajustada estrictamente a programa; que el funcionamiento de las obras ofrezca continuidad y seguridad en condiciones extremadamente exigentes, como sequías, terremotos, inundaciones, etc., permiten visualizar que el proyecto de las obras hidroeléctricas exige utilizar las tecnologías más avanzadas y las herramientas, como los modelos hidráulicos que puedan conducir finalmente a diseños de alta confiabilidad y máxima economía.

Adicionalmente a las consideraciones anteriores podría mencionarse que en nuestro país existen condiciones que conducen hacia una muy intensa utilización de modelos reducidos para la definición de sus proyectos hidroeléctricos futuros.

Al respecto, cabe indicar que en la actualidad sólo se ha desarrollado una parte menor del potencial hidroeléctrico existente, restando del orden de un 90% de él por realizar. Considerando que este potencial representa una fuente energética de importancia y que al estar basado en el aprovechamiento de un recurso natural, renovable y limpio, puede concluirse que debe ser integralmente utilizado en un futuro no demasiado lejano, ofreciendo, por lo tanto, un amplio campo para realizar nuevos proyectos y estudios.

En relación al tipo de centrales posibles de instalar, es preciso señalar que las condiciones básicas de diseño que presentan en nuestro país varían en forma significativa de un proyecto a otro, ya que la hidrología, geología, mecánica de suelos y características topográficas del territorio son muy diferentes de una hoya hidrográfica a otra y aun a veces dentro de una misma cuenca. Esto conduce a que las obras no sean repetitivas y a que cada nuevo proyecto plantee estructuras hidráulicas de características y condiciones de funcionamiento diferentes.

Finalmente, nuestro sistema eléctrico cada vez más extendido y de mayor relevancia permite la incorporación de grandes centrales generadoras, con la consiguiente economía de escala, pero asimismo las obras correspondientes son cada vez más complejas y de mayor envergadura, razón por la cual deben ser estudiadas con el mayor detalle y profundidad posibles.

Considerando lo expuesto respecto a las características generales de las

centrales hidroeléctricas y en especial sobre las condiciones que presenta el desarrollo futuro de nuestro potencial hidromecánico, puede asegurarse que el estudio en modelos reducidos será una herramienta de diseño y verificación, cuya utilización mantendrá su vigencia e importancia en los próximos años.

2.2. *Objetivos y Campo de Aplicación de los Modelos Hidráulicos en Relación al Diseño de Centrales Hidroeléctricas*

2.2.1. *Objetivos de los Modelos Reducidos*

En general podría mencionarse que los objetivos básicos de los modelos a escala reducida como elemento de apoyo para el diseño de centrales hidroeléctricas tienen relación con las siguientes materias:

— Verificación del funcionamiento adecuado de las estructuras, diseñadas de acuerdo a normas y técnicas usuales de proyecto.

— Optimización del diseño, tendiendo a introducir la economía máxima posible, reduciendo dimensiones de las obras hasta donde la seguridad y características de los escurrimientos lo permiten.

— Análisis de problemas o fenómenos no previstos en la etapa de diseño y que posteriormente durante la puesta en servicio o durante la operación de las obras se manifiestan.

— Para los profesionales especialistas en diseño hidráulico, el estudio en modelo es un elemento altamente positivo para desarrollar sanas y confiables prácticas de proyecto, pues la cabal comprensión del funcionamiento de las estructuras y de las características de los fenómenos hidráulicos en estudio proporcionan una base fundamental para confirmar y mejorar normas y criterios generales de diseño. El hecho que a través del modelo puedan ensayarse diversas soluciones o introducirse modificaciones de todo tipo, permiten confirmar teorías prácticas que, basadas en una sólida formación en hidráulica y en el estudio permanente de esta materia, conducen finalmente a la formación de especialistas de alto nivel en la especialidad.

Considerando el amplio campo de aplicación de los modelos y los objetivos indicados, resulta en la práctica un hecho comprobado que lo que se invierte en la realización del modelo no guarda relación alguna con los ahorros introducidos en las obras y las ventajas adicionales posibles de obtener, justificándose en definitiva en forma muy clara solamente por la parte económica pese a que también mejoran significativamente el conocimiento de las características del fenómeno hidráulico y del comportamiento de las estructuras diseñadas, contribuyendo también a que su

utilización sistemática permita ir formando especialistas de alto nivel en relación al diseño de grandes obras hidráulicas.

2.2.2. *Campo de Aplicación de los Modelos Reducidos*

De acuerdo a lo que se ha expuesto anteriormente, una de las características que ofrece el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico de nuestro país es la gran diferencia que presentan entre sí las distintas centrales posibles de instalar y, a su vez, la gran variedad de obras que las componen. Este hecho motiva un amplio campo de aplicación de los estudios en modelo.

A continuación se resumen aquellos aspectos del diseño de centrales hidroeléctricas en que este tipo de estudios resulta un factor importante para el éxito y optimización del proyecto.

Bocatomas, barreras y cámaras de carga.

 Bocatomas profundas.

 Bocatomas superficiales.

 Bocatomas de alta montaña.

 Cámaras de carga.

Obras de desviación.

 - Canales.

 Túneles.

Desagües de fondo de embalses.

Obras de evacuación.

 Vertederos.

 Rápidos de descarga.

Disipadores de energía.

Chimeneas de equilibrio (del tipo orificio).

Encauzamiento de ríos y protecciones de obras.

Compuertas planas y radiales.

Obras especiales.

3. ANÁLISIS DE ALGUNOS ESTUDIOS EN MODELO REALIZADOS EN ENDESA

3.2. *Modelo hidráulico de las obras de evacuación y de toma de la central Machicura*

En un modelo de fondo fijo, a escala 1 : 50, se abordó el diseño de las siguientes obras de la central Machicura:

- Obras de toma y de evacuación de la central Machicura.
- Obras de evacuación del embalse Machicura.

En la figura 1 se muestran en planta las obras de toma y de evacuación aludidas, observándose la íntima interrelación que existe entre ellas.

En la figura 2 se muestra, en planta y en corte, la singular estructura amortiguadora, destinada a minimizar las ondas generadas en el colchón disipador de energía del evacuador del embalse. Estas ondas, de no ser aminoradas, habrían exigido una mayor altura del canal de devolución al río Maule (23 km de largo) y provocado graves problemas de oscilación en la descarga de la central.

Los principales problemas que se estudiaron en este modelo fueron:

- Diseño de las excavaciones y de las bocas de entrada de las obras de toma para minimizar la formación de vórtices.
- Diseño de la estructura de control del evacuador de crecidas, de modo de obtener un flujo ordenado.
- Diseño de la evacuación de la central y de la confluencia con el evacuador del embalse para obtener un flujo tranquilo y gradual.
- Diseño de una estructura destinada a amortiguar las ondas generadas en el disipador de energía.

3.2. Modelo Hidráulico de la Bocatoma Polcura de la Central Antuco

En un modelo hidráulico de fondo móvil, a escala 1 : 40, se analizó el diseño de los diversos elementos que constituyen esta obra, que consta, grosso modo, de tres partes: obra de toma, barrera móvil (5 vanos de grandes compuertas radiales y 2 vanos desripiadores) y barrera fija. En la figura 3 se muestra en planta esta obra.

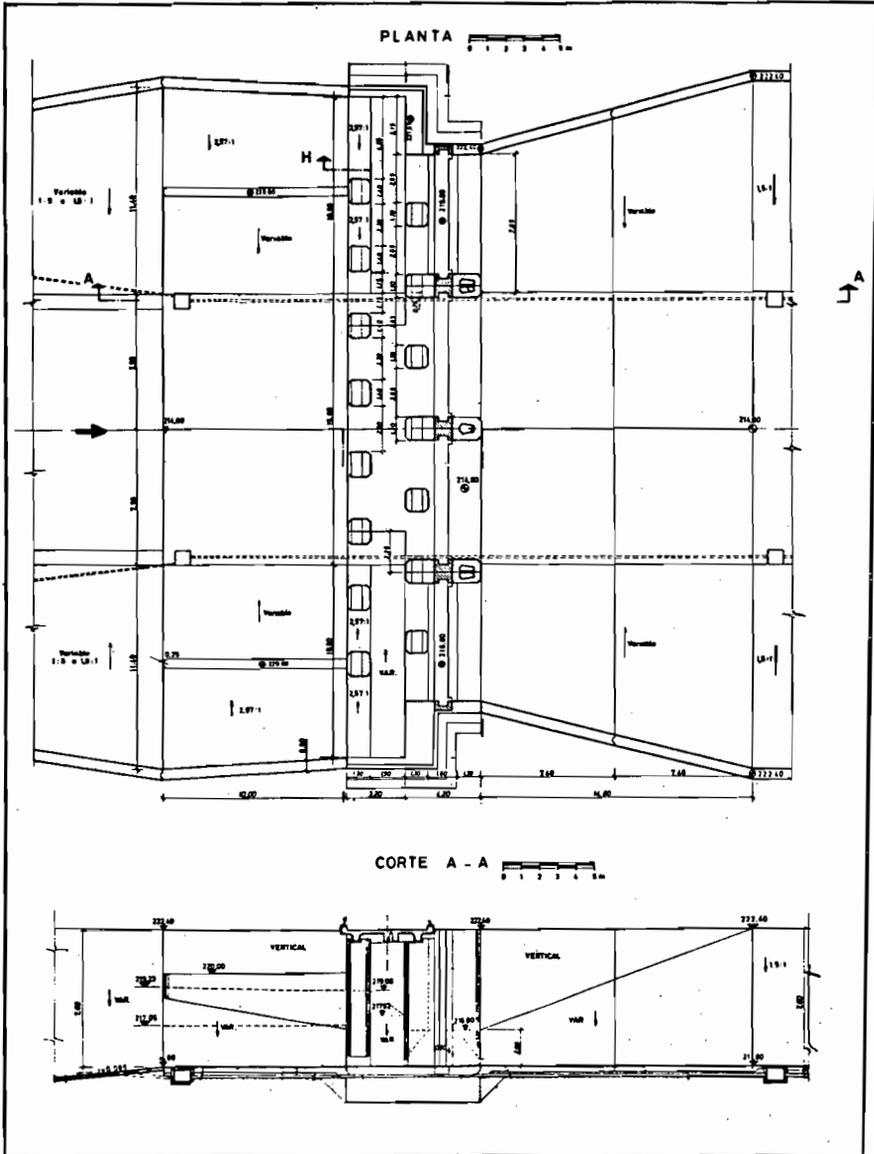
Se abordaron en este estudio diversos problemas de diseño, tales como: embanques, formación y eliminación de vórtices, protección con enrocados aguas arriba y aguas abajo de la barrera. Estos problemas no resultan posibles de resolver sin el modelo hidráulico, dada la compleja geometría del sistema.

Los problemas principales estudiados en este modelo fueron los siguientes:

- Diseño del canal de desviación durante la construcción de la obra de toma y de la barrera móvil.
- Diseño del muro guía de aguas arriba de la toma, cuya forma resultó decisiva para aminorar la formación de vórtices en las obras de toma y obtener un buen funcionamiento del canal desripiador.
- Diseño mismo del canal desripiador. El conocimiento de la forma en

PROYECTO COLBUN
Central Machicura
ESTRUCTURA AMORTIGUADORA

Figura N° 2



que el arrastre de fondo llega a la zona de la barrera permitió eliminar el sistema de purgas desripiadoras que se había diseñado para esta obra.

- Diseño de las protecciones aguas abajo de la barrera fija y del estribo izquierdo.
- Diseño de las protecciones con enrocados aguas arriba de la barrera móvil. Estas protecciones surgieron al analizar la operación de las compuertas durante las crecidas.
- Diseño de la forma de los machones de la barrera móvil para evitar la formación de vórtices.
- El problema que se estudió con mayor detalle correspondió al diseño de las protecciones de aguas abajo de la barrera móvil dadas las múltiples posibilidades de operación de ellas. El análisis de la operación de las compuertas desripiadoras exigió hacer cambios aguas arriba de ellas (pantalla y muro antivórtice). Hacia aguas abajo se debió proteger en forma exigente la ribera derecha contra la fuerte corriente de retorno que se producía durante la desripiación.

3.3. Modelo Hidráulico de la Presa Colbún

El diseño de las obras de desviación (2 túneles), de evacuación de crecidas (vertedero) y el estudio de las socavaciones posibles de producirse aguas abajo de la presa, se analizaron en un modelo hidráulico de fondo móvil, a escala 1 : 100. Además se estudiaron problemas que se produjeron durante la construcción de las obras de la presa así como las protecciones de la futura Central Chiburgo.

En la figura 4 se muestra la presa Colbún y la ubicación de los túneles de desviación y del vertedero. En la figura 5 se muestra el diseño final del vertedero.

Los problemas principales que se estudiaron en este modelo, socavaciones y protecciones, se debieron a los grandes caudales de diseño (caudal de 4.500 m³/s para la desviación y caudal de 7.500 m³/s para el vertedero).

El estudio en modelo tuvo por objeto analizar las erosiones al pie de la presa, al pie del salto de esquí y a la salida de los túneles de desviación.

Evacuador de crecidas

Los ensayos relativos al diseño de esta obra tuvieron por finalidad estudiar los siguientes aspectos: la orientación del eje del canal de descarga (se analizaron tres orientaciones), los muros laterales del canal de aproximación al vertedero, la forma de los machones de la estructura de control, al ancho del canal de descarga (se determinó que la mejor solución era la convergencia gradual de las paredes del canal de descarga), la forma del

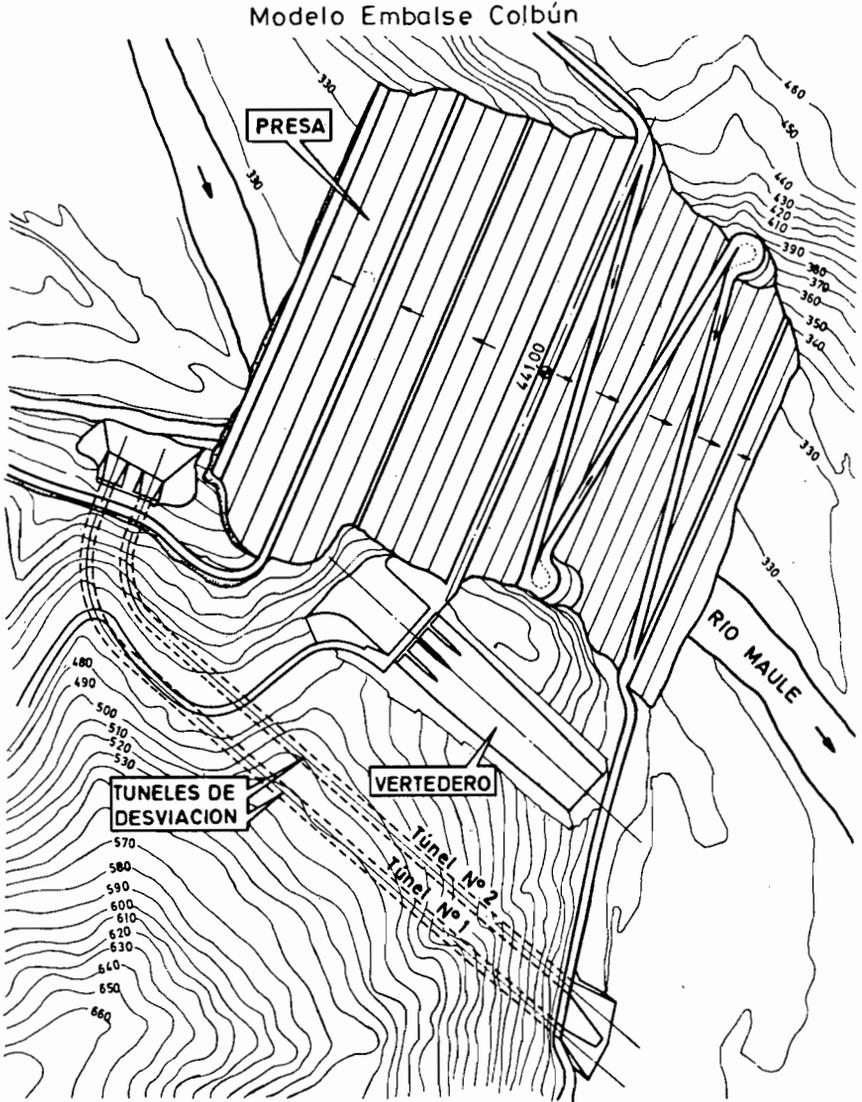


Figura 4

VERTEDERO COLBUN

Disposición General

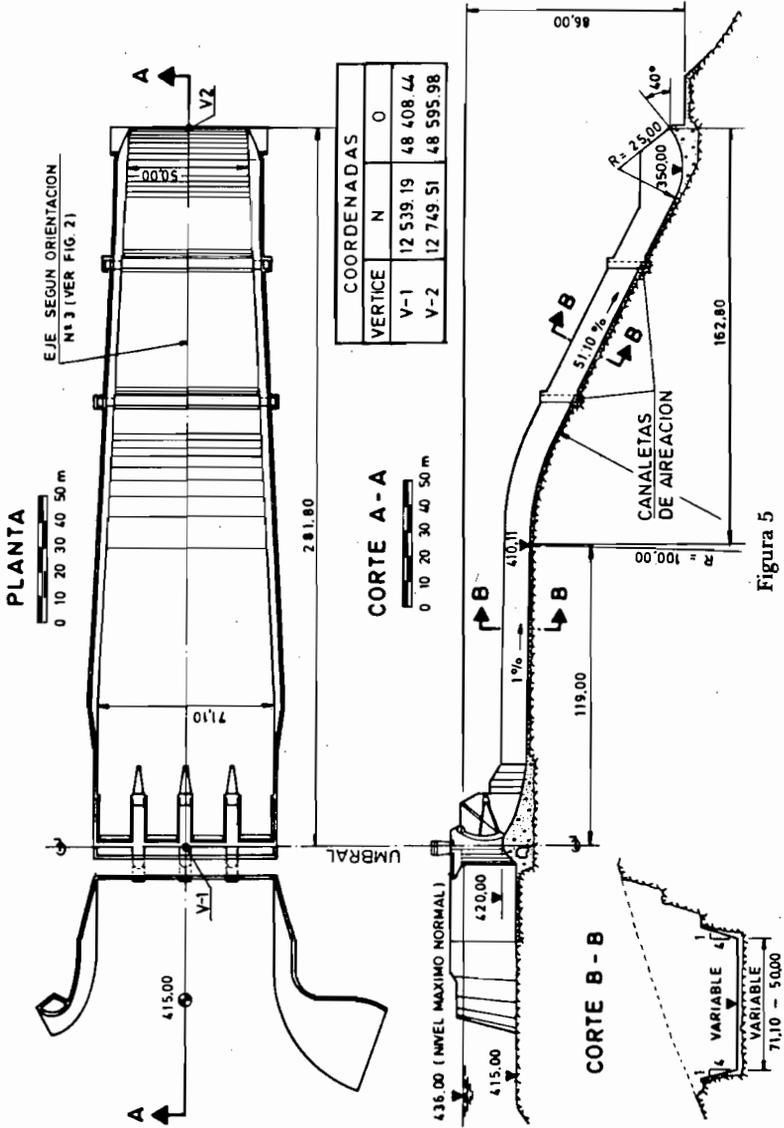


Figura 5

cuenco de lanzamiento, su ubicación en cota y el ángulo de lanzamiento; además se estudiaron las protecciones del pie de la presa y de otras obras. También se estudiaron en el modelo las normas de operación de las compuertas del vertedero.

Túneles de Desviación

En el modelo hidráulico se estudiaron diferentes tipos de obras de salida, buscando aquella que produjese la menor socavación aguas abajo de los túneles de desviación.

Los ensayos permitieron conocer las fluctuaciones de presión en el paramento de roca descubierto por la socavación del fluvial. Además se estudió el efecto erosivo de las corrientes de retorno.

El conocimiento de las fluctuaciones de presión y de las corrientes de retorno es necesario para poder predecir el comportamiento de la roca en que se apoya la obra de salida de los túneles de desviación y el salto de esquí.

3.4. Modelo Hidráulico del Evacuador de Crecidas del Embalse Vega Larga (Alto Polcura)

El embalse Vega Larga es una de las obras de la captación Alto Polcura que desvía aguas hacia el lago Laja, para incrementar la generación de la central El Toro.

En un modelo hidráulico de fondo móvil a escala 1 : 40, se estudió el diseño del evacuador de crecidas y del dissipador de energía del embalse Vega Larga.

El problema principal que se investigó en este estudio fue el diseño del evacuador de crecidas. Las características topográficas y geológicas de la zona de la descarga, el hecho de tratarse de una presa de tierra y de difícil acceso, impusieron criterios exigentes en cuanto a las características del escurrimiento devuelto al río aguas abajo de la obra.

En la figura 6 se muestra el diseño final del dissipador de energía.

La imposición de entregar un flujo tranquilo y en ángulo con el eje del rápido de descarga del evacuador, condujo a un diseño muy especial del dissipador de energía.

4. LISTADO DE MODELOS

Corroborando lo expresado en relación a la utilización de modelos reducidos para el diseño específico de obras hidroeléctricas, se resume en el

listado que sigue el conjunto de estudios de este tipo que ha realizado la Empresa Nacional de Electricidad S.A. (ENDESA) para el diseño de sus centrales generadoras.

N° central o proyecto	Nombre modelo	Laboratorio Hidráulico	País	Años
1 C. Sauzal	Sifones evacuadores del canal de aducción	U. Católica	Chile	1942
2 C. Sauzal	Bocatoma Cachapoal	U. Chile	Chile	1944-1945
3 C. Pilmaiquén	Cámara de carga	U. Chile	Chile	1948
4 C. Lago Laja	Disipación energía chorros de alta velocidad	U. Chile	Chile	1953
5 C. Abanico	Disipador de energía	U. Chile	Chile	1954
6 C. Rapel	Modelo presa	U. Chile	Chile	1957
7 C. Pullinque	Sifones evacuadores	U. Chile	Chile	1957
8 C. Isla	Orificio restricción chimenea de equilibrio	U. Chile	Chile	1958
9 C. Lago Laja	Piques de la bocatoma	U. Chile	Chile	1958
10 C. Pullinque	Compuertas automáticas	U. Chile	Chile	1958
11 C. Rapel	Río Rapel aguas abajo de la presa	Chatou	Francia	
12 C. Rapel	Modelo presa	Chatou	Francia	1960-1963
13 C. Isla	Disipador de energía	U. Chile	Chile	1959
14 C. Isla	Compuertas automáticas	U. Chile	Chile	1960
15 C. Abanico	Cámara de carga	U. Chile	Chile	1960
16 C. Isla	Ventilación compuertas automáticas	U. Chile	Chile	1961
17 C. Pullinque	Ventilación compuertas automáticas	U. Chile	Chile	1961
18 C. Rapel	Modelo presa	U. Chile	Chile	1963-1967
19 C. Rapel	Modelo presa	Rapel	Chile	1964-1967
20 C. Abanico	1 ^{er} y 2 ^o tiro noruego (Lago Laja)	U. Chile	Chile	1964
21 C. Rapel	Compuerta y evacuador medio fondo	Karlsruhe	Alemania	1965-1966
22 C. Isla	Compuertas bocatoma Maule	Karlsruhe	Alemania	1965
23 C. Isla	Bocatoma Maule	U. Chile	Chile	1966-1967
24 C. El Toro	Túnel de evacuación	U. Chile	Chile	1967-1968
25 C. Colbún	Evacuador de crecidas	Rapel	Chile	1968-1969
26 C. Abanico	3 ^{er} tiro noruego	Peñaflor	Chile	1969
27 C. Antuco	Río Polcura cerca de El Toro	Peñaflor	Chile	1969-1970
28 C. El Toro	Tiro noruego	Peñaflor	Chile	1969-1970
29 C. Antuco	Cubeta disipadora bocatoma Polcura	Peñaflor	Chile	1969

Nº central o proyecto	Nombre modelo	Laboratorio Hidráulico	País	Años
30 C. El Toro	Protecciones evacuación	Peñaflor	Chile	1969
31 L. Charrúa	Socavación en torres de alta tensión	Peñaflor	Chile	1969
32 C. Antuco	Barrera Polcura	Peñaflor	Chile	1970
33 C. Antuco	Bocatoma Polcura en Rayenco	Peñaflor	Chile	1971-1975
34 C. Rapel	Caídas canal Teno-Chimbarongo	Peñaflor	Chile	1971
35 C. Rapel	Barrera Teno	Peñaflor	Chile	1973
36 C. Colbún	Presa Colbún	Peñaflor	Chile	1974-1975
37 OCAP - C. El Toro	Embalse Vega Larga	Peñaflor	Chile	1974-1975
38 C. Colbún	Presa Colbún	Cerro Navia	Chile	1975-1985
39 OCAP - C. El Toro	Sifón Quemazones	Cerro Navia	Chile	1976-1977
40 OCAP - C. El Toro	Túnel by-pass Vega Larga	Cerro Navia	Chile	1976-1977
41 C. Antuco	Protección patio de alta tensión	Peñaflor	Chile	1977-1978
42 C. Machicura	Obras de evacuación y toma	U. Católica	Chile	1977-1980
43 C. Antuco	Compuertas barrera Polcura	Graz	Austria	1978
44 C. Colbún	Chimenea de equilibrio	U. Chile	Chile	1980
45 P. Colbún	Erosión de materiales semicohesivos	U. Chile	Chile	1981
46 P. Colbún	Estructura disipadora de energía de las válvulas Howell-Bunger	E. H. I. Longmont	USA	1981-1982
47 P. Colbún	Desagüe de fondo de la presa de Colbún	CTH-Sao Paulo	Brasil	1981-1982
48 C. Pehuenche	Bocatoma Maule	U. Chile	Chile	1981-1983
49 C. Pehuenche	Evacuador y desviación de la presa Melado	Georgia Inst.	USA	1982-1983
50 P. Colbún	Compuertas del desagüe de fondo de la P. Colbún	Graz	Austria	1983-1984
51 C. Pehuenche	Desviación presa Melado	U. Católica	Chile	1984-1985
52 C. Chiburgo	Protec. casa de máquinas	Cerro Navia	Chile	1985
53 C. Canutillar	Tiro noruego (en licit.)		Chile	1985

BIBLIOGRAFÍA

- Archivo Sección Obras Hidráulicas - ENDESA.
Memoria Post-Congreso del VII Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Santiago, 1976.
Proyecto Captación Alto Polcura - ENDESA.
Proyecto Central Antuco - ENDESA.
Proyecto Centrales Colbún y Machicura - ENDESA.
R. RIEDEL. *Algunas conclusiones del estudio experimental del evacuador de crecidas de la presa Colbún*.
VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Santiago, 1983.
K. PONTANI, *Determinación teórico-experimental de los coeficientes de resistencia de una chimenea de equilibrio de orificio restringido*. V Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Santiago, 1981.
R. RIEDEL. *Algunas conclusiones del estudio experimental del evacuador de crecidas de la presa Colbún*. VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Santiago, 1983.