

IAHR

CIC

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012****COMPARACIÓN DE SIMULACIONES EN CFD Y MODELACIÓN FÍSICA  
DE UNA CENTRAL HIDROCOMBINADA*****Gonzalo Duró, Mariano de Dios, Alfredo López, Sergio Liscia, Mauricio Angulo****Laboratorio de Hidromecánica UNLP, Argentina**gzduro@gmail.com, dediosmariano@gmail.com, lopito.82@gmail.com**soliscia@ing.unlp.edu.ar, mauricio.angulo@ing.unlp.edu.ar***RESUMEN:**

En los últimos años, los modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) han evolucionado hasta convertirse en una alternativa viable a la modelación física en los procesos de diseño hidráulico y optimización. No obstante, el empleo de estos modelos requiere de observación y análisis crítico para poder obtener resultados confiables al estudiar cambios de diseño. En este sentido, este artículo pretende contribuir al análisis de la comparación de los resultados obtenidos por medio de una u otra modalidad de modelación, y evaluar las similitudes y diferencias encontradas, a fin de corroborar si la confiabilidad de la herramienta numérica está justificada.

El trabajo muestra los resultados de la modelación física y matemática de una central hidrocombinada funcionando en el modo de vertedero. Sendos resultados se sometieron luego a la comparación cuantitativa y cualitativa de las variables clave, tales como la elevación de la superficie libre, la presión en puntos selectos del contorno hidráulico, y la amplitud y frecuencia de las fluctuaciones de presión del escurrimiento, así como su comportamiento general.

**ABSTRACT:**

During the last years, CFD models have turned into a valuable alternative to physical modeling when applied to hydraulic design and optimization processes. However, observation and critical analysis should be exercised in order to use their results with confidence when dealing with hydraulic design changes. The present work is thus intended to contribute to the analysis of the relative performance of either approach and evaluate similarities and differences found, with the aim of corroborating if the reliability on numerical tools is actually warranted.

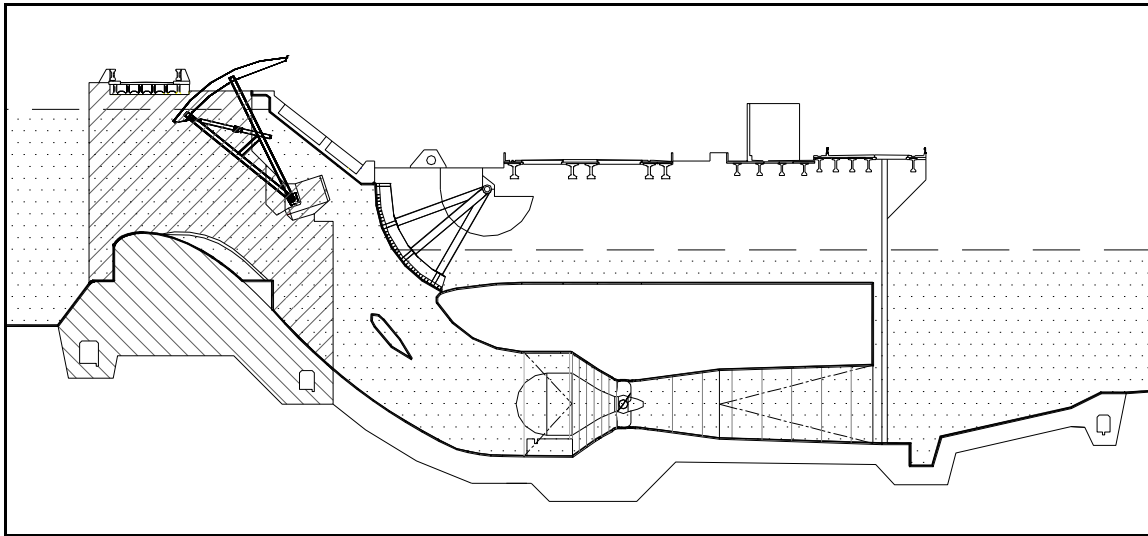
This work shows the results of physical and mathematical modeling of a hydrocombined plant when working in spillway mode. Both sets of results (including key parameters such as the height of the free surface, pressure at selected points of the hydraulic contour, and frequency of the flow fluctuations, as well as the general flow patterns) were then subjected to quantitative and qualitative comparison.

**PALABRAS CLAVES:** *Confiabilidad CFD, Modelación Física, Central Hidrocombinada*

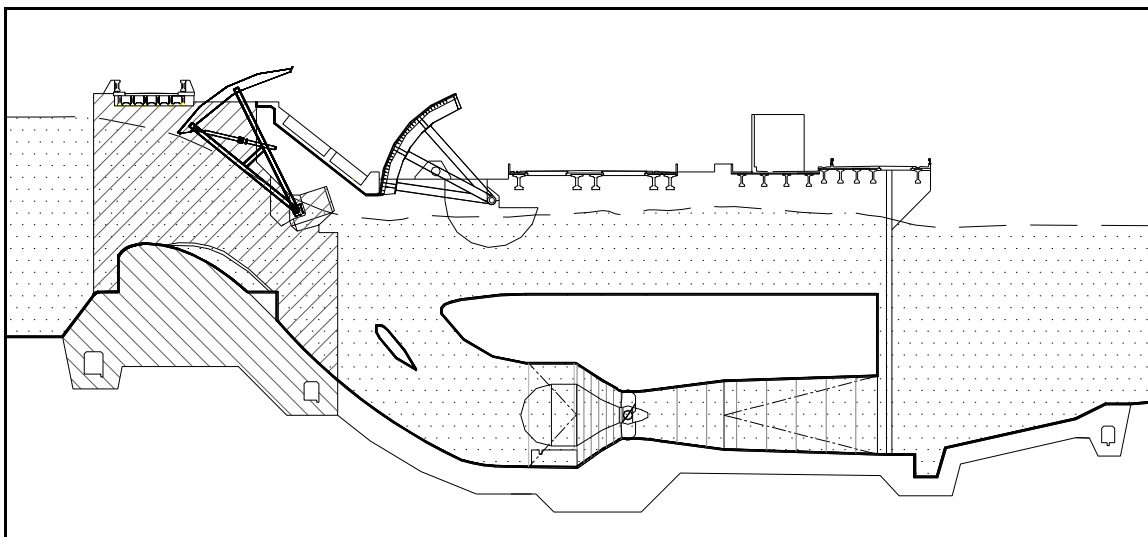
## INTRODUCCIÓN

En el marco del asesoramiento técnico que las Universidades de La Plata y de Misiones prestan a la Entidad Binacional Yacyretá (Argentina y Paraguay), se lleva a cabo un trabajo de modelación física y matemática, sobre un diseño que modifica 5 vanos de los 16 que posee uno de los vertederos de evacuación de crecidas de Yacyretá, para que cumplan una doble función. El proyecto global esta a cargo de la consultora Montgomery Watson Harza.

Los trabajos realizados para este proyecto han incluido numerosas simulaciones en CFD bajo distintas condiciones de operación de la central durante la descarga de la crecida máxima probable y también en el modo de generación de energía, con el fin de arribar a un diseño que permitiera la coexistencia de ambas funciones en forma adecuada.



**Figura 1.-** Central en generación - Vista en corte



**Figura 2.-** Central en crecida - Vista en corte

La secuencia de trabajo en el desarrollo del proyecto tuvo varias etapas. En primera instancia, se partió de un diseño de central que contemplaba el accionamiento de compuertas planas para la transformación de la central a vertedero y posteriormente, ante el requerimiento de prescindir de elementos de acción mecánica que se encuentren sumergidos, se evaluó la posibilidad de generar un contorno hidráulico sin la necesidad de un contorno sólido, como el provisto por las compuertas planas. Para ello se modelaron en CFD las primeras alternativas que poseían un diente deflector y ante el buen comportamiento se llevó a cabo la verificación en un modelo físico de escala 1:50. Dicho modelo no poseía el detalle geométrico que finalmente se requirió para hacer las

mediciones de presiones y de superficie libre, pero dio el aval para comenzar las posteriores simulaciones en CFD que optimizaron la geometría, mientras que en forma simultánea se construyó un nuevo modelo de escala 1:40. Luego de más de una decena de diseños considerados y casi tres decenas de simulaciones (realizadas paralelamente al cálculo estructural de la central) se ensayó el diseño optimizado de la misma.

En síntesis, el proceso de optimización de la geometría de la central se realizó principalmente mediante un modelo CFD y luego se realizó con este diseño el modelo físico para validar los resultados.

En este contexto, el presente trabajo se sitúa en la comparación de la modelación matemática en tres dimensiones frente a los resultados experimentales de la modelación física, para un diseño en particular y en la condición de funcionamiento que resultó crítica en el proceso de optimización. El escenario contemplado fue la operación de la central frente a la crecida máxima probable en el estado en el que todos los vanos de los vertederos de Yacyretá se encuentran con su apertura máxima y el nivel del embalse se sitúa en el mínimo: la cota 80.00 msnm, tres metros por debajo del nivel de operación normal. En esta situación, la energía total sobre la cresta del vertedero es la mínima esperable y el pasaje de la crecida por los vanos modificados es crítica debido al bajo número de Froude de ingreso y la necesidad de sortear la aducción a las turbinas antes de descargar por encima de las galerías de la central.

## MODELACIÓN FÍSICA

El modelo físico de la estructura estudiada se montó en las instalaciones del Departamento de Hidráulica de la Universidad Nacional de La Plata.

El modelo se realizó en escala de Froude. La escala del modelo físico fue de 1:40. Las restantes escalas resultan:

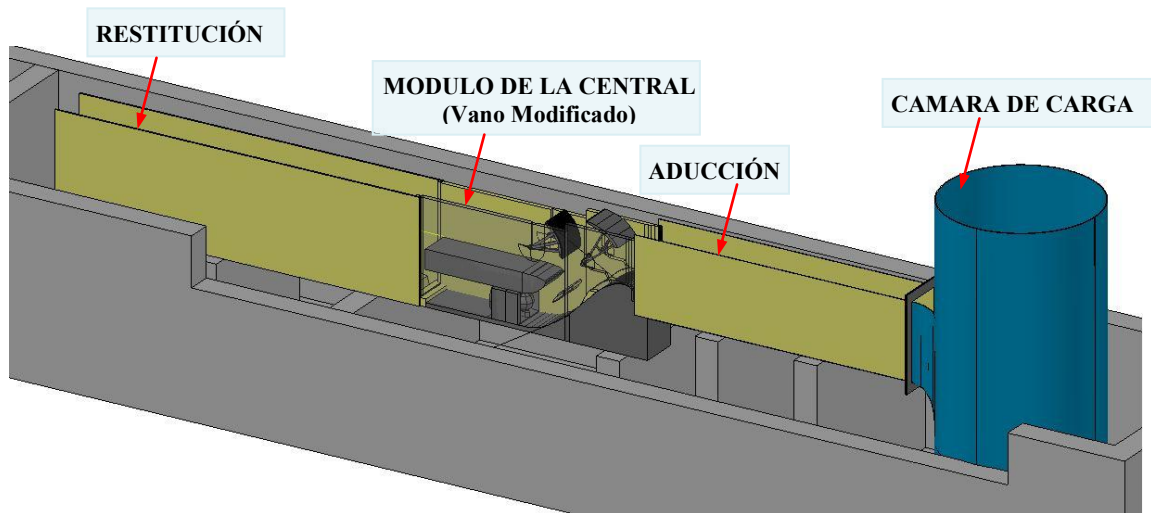
- Escala Velocidad: 1:6.32
- Escala de tiempos: 6.32
- Escala Caudal: 1:10119
- Escala de Presiones: 1:40

El modelo físico corresponde a uno de los cinco vanos del vertedero modificado en su condición de evacuador de crecidas. Hacia aguas arriba se extiende abarcando parte del embalse. Un módulo completo de la central desde el vertedero hasta el final de la nueva rápida fue representado así como parte de la restitución, donde impacta el agua que pasa por el vertedero. En la Figura 1 se puede observar un esquema de la geometría modelada.

Tanto el canal de aducción como el de restitución fueron materializados con placas de polipropileno de un espesor de 12 mm, mientras que la estructura resistente era de acero inoxidable.

La zona del módulo de la central presentaba uno de los laterales en acrílico, de manera de facilitar la visualización del escurrimiento. La conformación del perfil vertedor junto con la solera del canal que se encuentra sobre la central y la toma de ingreso a la turbina (incluida la “nariz” del canal) fueron fabricados en chapa de acero inoxidable de espesor de 2 mm.

Las piezas más complejas (las pilas, escotaduras de las dos compuertas, puntal, etc.) fueron fabricadas en un banco de mecanizado a partir de control numérico para garantizar la precisión en su construcción (Fig. 4).



**Figura 3.-** Instalación de ensayo del modelo físico en escala reducida

La aducción al modelo se efectúa a través de una cámara de carga circular, con la posibilidad de regular los niveles de agua a partir de un vertedero tipo “morning glory”. Los niveles en el canal de restitución son controlados mediante una compuerta plana abatible.

El escenario ensayado corresponde a una cota de embalse de 80.00 msnm. Se puede observar el funcionamiento de la estructura de alivio para esta condición en la **Figura 4**.



**Figura 4.-** Piezas fabricadas con control numérico. Funcionamiento en cota 80.00 msnm

## MODELACIÓN MATEMÁTICA

Las simulaciones en CFD se realizaron mediante el software comercial FLOW-3D que resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. Este modelo posee la capacidad de representar la superficie libre y hacer simulaciones de escurrimientos impermanentes.

Para los problemas de flujos considerados incompresibles la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mu A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad [1]$$

Cuando se está trabajando con el sistema de coordenadas cartesianas R es igual a la unidad y  $\xi$  es igual a cero.  $R_{SOR}$  contempla las fuentes de masa y A son las fracciones de áreas abiertas al flujo en las direcciones "x", "y" y "z".

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido son:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y v u}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad [3]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad [4]$$

En estas ecuaciones G es la aceleración de la masa según la dirección que indica en subíndice, f la aceleración viscosa, b es la pérdida en medios porosos (si los hubiera) y los últimos términos corresponden a fuentes de masa representadas por componentes geométricos.

El espacio que se pretende modelar es discretizado mediante una malla estructurada de celdas prismáticas donde se aplican las ecuaciones mencionadas y se las resuelve numéricamente. El FLOW-3D diferencia la fracción de cada celda que es sólido y la fracción que puede estar ocupada por fluido mediante el método FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) y esto permite un mallado regular que resulta rápido y de simple ejecución.

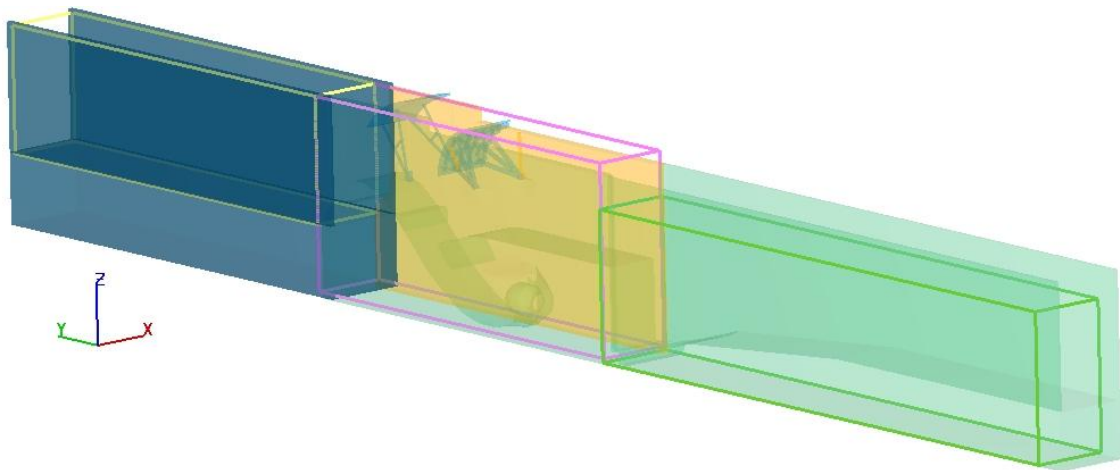
El software no tiene un límite superior especificado en cuanto a la cantidad de celdas que puede tener una simulación. Sin embargo por cuestiones prácticas y de plazos de proyecto es conveniente definir una cantidad de celdas apropiada con el fin de tener una respuesta en un tiempo razonable y con una precisión adecuada para el problema que se quiere representar. Sin embargo, muchas veces no se utiliza la precisión de mallado que se pretendería si se dispusiera de más tiempo, por lo que persiguiendo obtener resultados de aplicación práctica, en el presente artículo se compararon los resultados de la modelación física con modelaciones que tuvieron una cantidad de celdas intermedia, considerando una capacidad de cómputo razonable.

## Metodología, mallado y condiciones de borde

La metodología de trabajo consistió en simular el modelo físico descrito previamente y un modelo geoméricamente semejante pero en escala prototipo para evaluar y contrastar los posibles efectos de escala. En cada caso, se realizó una corrida de estabilización del régimen con un mallado grueso y luego se realizó otra para estabilizar el régimen a partir del primero pero con un mallado más fino.

Los bloques de mallas dispuestos fueron tres (Fig. 5). Uno para la aducción, uno para la central propiamente dicha, y otro para la restitución. El motivo de separar el dominio en estos bloques de mallas fue el tener la menor cantidad de celdas posibles en el dominio ajustando los mismos al mínimo espacio que ocupe el fluido, y en el caso del bloque de la restitución, disponer celdas más gruesas que en la central y aducción dado que no era el espacio que iba a ser analizado posteriormente.

En el presente trabajo, se dispuso en la aducción y la central un tamaño de celdas en los bloques de malla que tenía una relación con la carga total sobre la cresta del vertedero de 1/27. Es decir que, para la escala del modelo, la carga sobre la cresta fue de 0.3375 metros y el tamaño de celdas fue de 0.0125 metros. La simulación a la escala de prototipo tuvo la misma relación de tamaño de celdas, y estas tuvieron lados de 0.50 metros, dada la carga de 13.50 metros sobre la cresta real. En ambas simulaciones la cantidad de celdas fueron 1.100.000, que con un procesador i7 y 8GB de memoria RAM se pueden hacer las simulaciones en dos días aproximadamente.



**Figura 5.-** Mallado del dominio

Las condiciones de borde utilizadas fueron de nivel de energía total en la aducción y en la restitución, cuyo niveles correspondieron a la cota de embalse de 80.00 msnm y el nivel de restitución 68.8 msnm en prototipo.

El modelo de turbulencia utilizado fue el k- $\epsilon$  RNG, con una longitud característica del escurrimiento adoptada como el tirante medio sobre la cresta del vertedero. Por otro lado, la precisión de cálculo de la cantidad de movimiento fue de tercer orden.

## COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La verificación de los resultados del modelo matemático a partir del físico se realizó mediante comparaciones cualitativas de las condiciones generales del escurrimiento, y cuantitativas evaluando las presiones en ciertos puntos de la geometría y la elevación de la superficie libre. Por otro lado, ante las evidencias de la presencia de un fenómeno fluctuante que se manifestaba sobre la boca de aducción a la turbina, se analizó si éste se correspondía entre los modelos.

En forma sintética, se presentan los resultados de la modelación física con una escala 1:40, la modelación matemática en escala de modelo físico, y la modelación matemática con los resultados transpuestos a escala prototipo.

### Comportamiento general del escurrimiento

La observación del escurrimiento sobre la estructura de descarga en términos generales se aprecia de características similares entre los modelos físico y matemático, éste último en sus dos escalas.

El pasaje del flujo a alta velocidad es franco a través de la central, aún a pesar del bajo número de Froude cuyo valor sobre la cresta del vertedero es 1,30.

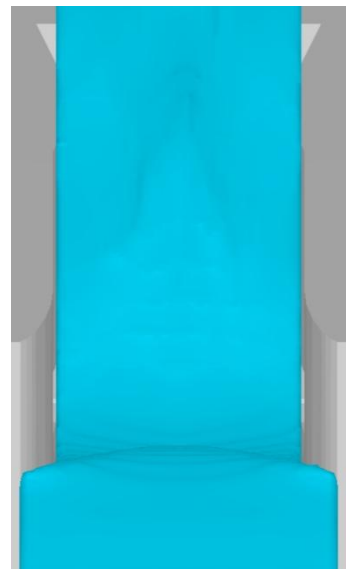
La representación de la superficie libre, en cuanto a las ondas estacionarias que se aprecian en la modelación física sobre el canal de descarga y sobre la cresta del vertedero, se pueden observar en las modelaciones matemáticas pero con dificultad. Éstas se presentan atenuadas, posiblemente debido a que el tamaño de celdas dispuestas en las modelaciones no alcanza para representar con mayor precisión la superficie libre. Como se ha mencionado, el tamaño de las celdas se eligió con la intención de reproducir una corrida accesible en tiempos cortos y con una capacidad de cómputo no excesiva, para identificarse con las situaciones más regulares de cálculo durante el proceso de optimización de un diseño.

Por otro lado, el modelo físico mostraba una leve oscilación de la superficie libre que se trasladaban aguas abajo por el canal, que no pudieron ser representadas por las modelaciones CFD.

Aun así, se aceptan las simulaciones matemáticas como acertadas en su representación del comportamiento general del flujo.



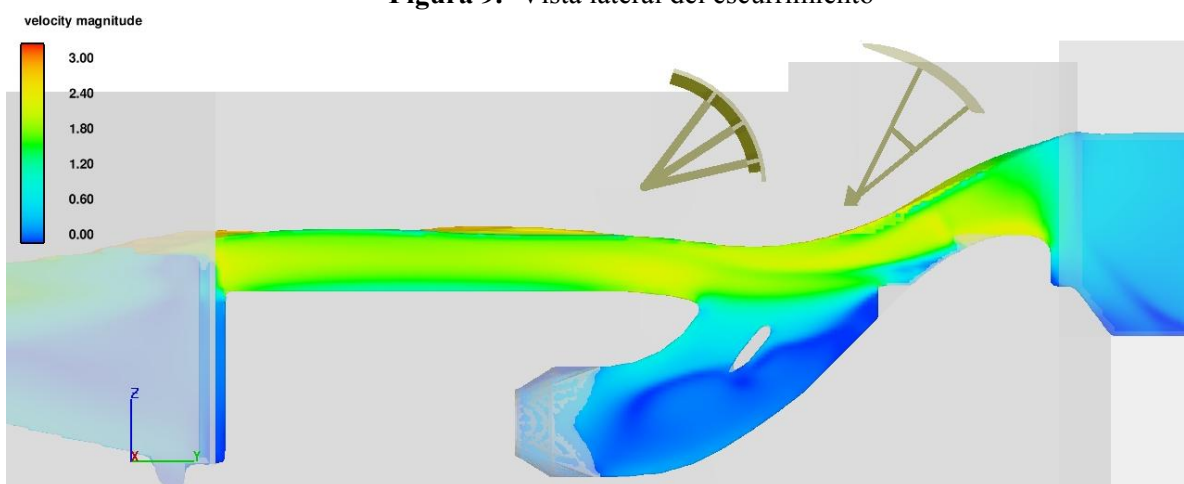
**Figura 6.-** Descarga del vertedero modificado



**Figura 7.-** Modelo CFD en escala 1:1



**Figura 9.-** Vista lateral del escurrimiento



**Figura 10.-** Vista lateral del CFD en escala del modelo físico

### Presiones y perfil de la superficie libre

La medición de la presión se analizó en puntos clave de las tomas de presión que se dispusieron en el modelo físico. De las 19 tomas que se colocaron se muestra el resultado de siete

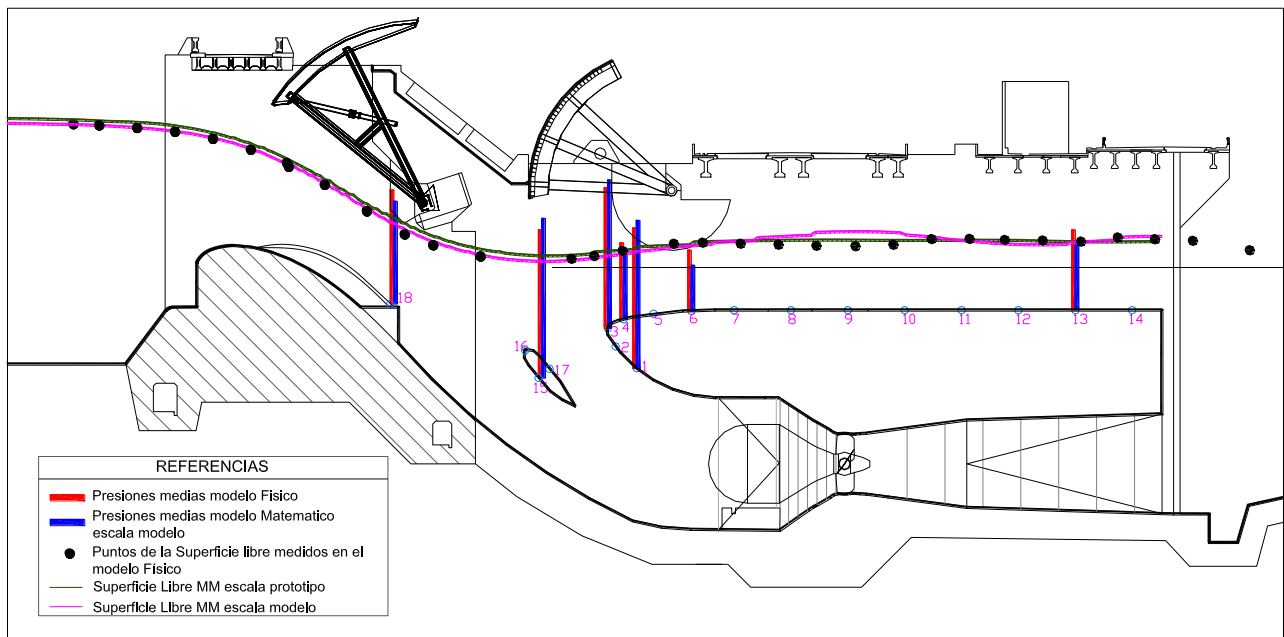
de ellas y se las compara con el registro obtenido mediante el CFD en la escala del modelo. Todas las tomas de presión fueron colocadas en el eje del vano.

Por otro lado, se midió el nivel de la superficie libre a lo largo del vano, también en el eje del mismo, y se lo comparó con los niveles evaluados en el CFD en escala 1:40 y 1:1.

Los resultados se resumen en la Figura 11. En la misma se observan las presiones representadas con barras, en la escala correspondiente con el esquema. Puede verse que hay diferencias entre los modelos, pero éstas en general no son excesivas.

Las presiones en las tomas 1, 3, 15 y 18 se ven incrementadas respecto a la elevación de la superficie libre sobre las mismas posiblemente debido a la reducción de la energía cinética de las partículas de agua que llegan a la nariz del canal (tomas 1 y 3), al diente deflector (toma 18) o al puntal (toma 15).

En el caso de la tomas 6, puede verse una discrepancia entre los modelos. Mientras que en el modelo físico parece corresponder la presión con la hidrostática, el modelo matemático acusa un descenso respecto de la misma, situación que puede relacionarse con la falta de seguimiento del flujo en la geometría del final de la nariz. En este caso, el CFD puede justificar un cambio en esta geometría, mientras que el modelo físico conduce a una conclusión distinta. Más allá de este enfoque, las diferencias en los valores pueden considerarse aceptables, entendiendo que la modelación física continúa siendo el respaldo de la matemática y aquella es la instancia definitoria del diseño.



**Figura 11.-** Presiones medias MF y MM escala 1:40. Niveles de superficie libre de los tres escenarios.

	Punto 1	Punto 3	Punto 4	Punto 6	Punto 13	Punto 15	Punto 18
	[mca]	[mca]	[mca]	[mca]	[mca]	[mca]	[mca]
Modelo Físico	0.31	0.37	0.20	0.17	0.21	0.39	0.30
Modelo Matemático	0.33	0.39	0.17	0.12	0.17	0.42	0.27

**Figura 12.-** Presiones medias temporales

### Fluctuaciones de presión

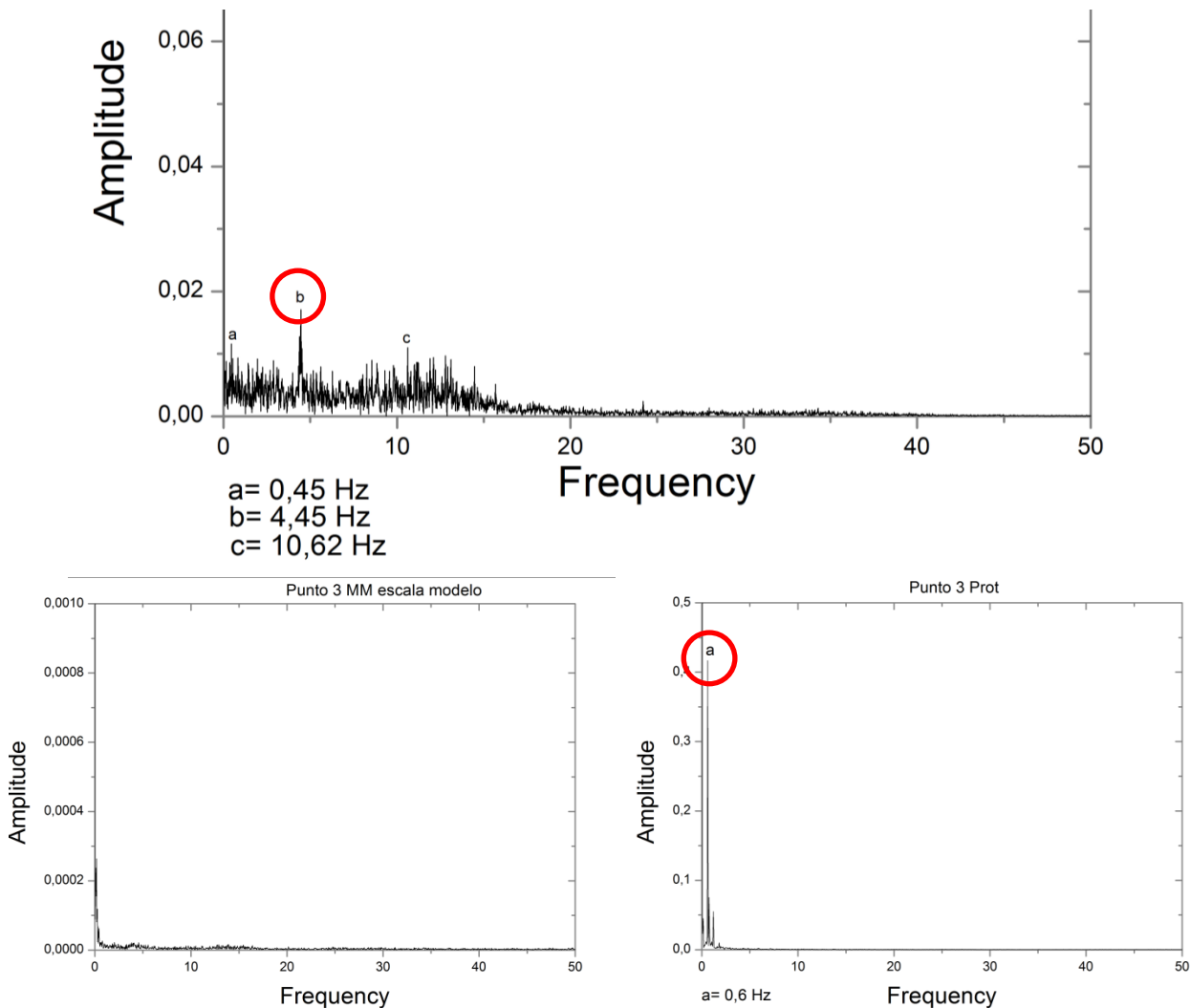
Se analizaron los espectros de frecuencias de todas las tomas de presión y se encontró que la toma N°3 posee una frecuencia dominante que podría ser de interés evaluar, dada una leve oscilación de la superficie libre sobre la nariz del canal observada en el modelo físico, y las fluctuaciones del campo de presiones que se observaron en el modelo CFD a la escala prototipo. Se



presentan los espectros de frecuencias de las toma en cuestión con las tres modelaciones efectuadas (Fig. 13).

De la observación de los espectros, puede deducirse en primer lugar que las amplitudes de las fluctuaciones del CFD a la escala del modelo no son significativas, evidenciando un claro estado de permanencia temporal del escurrimiento y del campo de presiones en particular.

Por otro lado, el espectro del CFD a la escala prototipo muestra una frecuencia dominante de 0.60 Hz con una amplitud de 0.40 metros de columna de agua. Analizando el espectro del modelo físico se aprecia que la frecuencia con mayor amplitud corresponde a la de 4.45 Hz cuya magnitud es 0.017 metros de columna de agua.



**Figura 13.-** Espectros de frecuencia del modelo físico (arriba), CFD escala modelo (abajo izquierda) y CFD escala prototipo (abajo derecha).

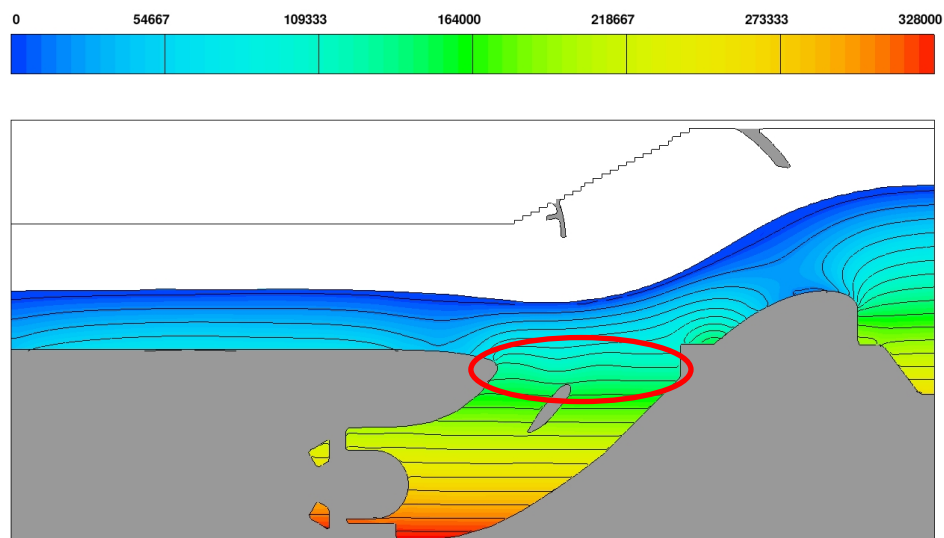
Al calcular el número de Strouhal para este fenómeno oscilante que se relaciona con la estela desprendida aguas abajo del diente deflector (Fig. 14) se obtuvo el valor de 0,28.

$$S = \frac{f * L}{V} \quad [5]$$

La longitud característica “L” considerada fue la altura del diente deflector, 4m en prototipo y 0.10m en modelo. La velocidad característica se tomó como la media sobre la cresta del vertedero en ambos casos, evaluada a partir del tirante medio y el caudal escurriente.

El número de Strouhal es un parámetro de similitud y al igualarlo entre modelo y prototipo se desprende que la frecuencia correspondiente a la escala de prototipo debería ser de 0,74. El modelo matemático como se indicó arrojó una frecuencia de 0.60 Hz. Si bien ésta no coincide en

forma exacta con la esperada por la teoría de la similitud, es válido advertir que es cercana al valor en cuestión y que el modelo CFD en escala prototipo pudo identificar el fenómeno fluctuante de mayor intensidad.



**Figura 14.-** CFD escala prototipo. Campo de presión y fluctuación aguas abajo del deflector

## CONCLUSIONES

En líneas generales se comprueba que este modelo CFD es apto para el proceso sistemático de optimización del diseño de obras hidráulicas en la etapa preliminar. Esta etapa de cambios sucesivos es necesaria para acortar tiempo y esfuerzos que mediante otra metodología implicarían mayores costos finales. Puede afirmarse que se obtiene un comportamiento del fluido bien representado en las escalas más grandes, a pesar de no contar con mallas muy refinadas y con modelos de turbulencia que con la debida aplicación podrían arrojar resultados más precisos, tales como el LES. Asimismo, tanto la superficie libre como las presiones medias del escurrimiento fueron representadas en forma aceptable. Vale destacar que los fenómenos fluctuantes de mayor magnitud fueron también identificados por una modelación CFD, pero en este caso solo con la escala del prototipo, por lo que se advierte que hay que atender a los fenómenos de escala pero sobretodo a la capacidad de cálculo de las simulaciones que se abordan. En este estudio se prepararon simulaciones con celdas de tamaño intermedio, en estudios sucesivos se comparará también el efecto del tamaño de malla en la representación de aquellos fenómenos.

## REFERENCIAS

- Sergio Liscia, Mauricio Angulo, Mariano de Dios, Mercedes del Blanco** (2010). "Modelación Matemática y Física de un Vertedero Modificado". *Actas del IAHR XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay*.
- Liscia, S.O., Angulo, M.A. y Lugo, M.V.** (2010). "Modelación física y matemática de una obra de derivación". XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- D. Ho, K. Boyes, S Donohoo, B. Cooper.** "Numerical Flow analysis for spillways". *43th ANCOLD Conference, Tasmania, Oct 2003*.
- P. Chanel, J. Doering** (2008). Assessment of spillway modeling using computational fluid dynamics. *Canadian Journal of Civil Engineering, NRC, Vol. 35, Dec 2008, pp. 1481-1485*.
- Ferziger J.H., Peric M.** Computational Methods for Fluid Dynamics, 3<sup>rd</sup> Edition. Springer. Berlin, Germany.