

ARTÍCULO ORIGINAL / ORIGINAL ARTICLE

**Interacción entre modelación física y numérica para el diseño de obras hidráulicas y validación de simulaciones CFD**

**Interaction between physical and numerical modeling for the design of hydraulic works and validation of CFD simulations**

Alfredo R. López Fernández<sup>1</sup>, Adriana M. Ruiz Díaz Cardoso<sup>1</sup>, Mariano de Dios<sup>2</sup>, Sergio Liscia<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería. San Lorenzo, Paraguay.

<sup>2</sup> Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería, (UIDET Hidromecánica). Mar del Plata, Argentina.

Autor de correspondencia: lopito.82@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.32480/rscp.2018-23-2.227-240>

Recibido: 15/11/2018. Aceptado: x15/12/2018.

**Resumen:** los modelos físicos constituyen una poderosa herramienta para el diseño y optimización de obras hidráulicas de gran envergadura y complejidad en lo referente a su implantación y funcionamiento. En la etapa de proyecto permite visualizar el funcionamiento de la futura obra ante las condiciones de diseño previstas, así como, otras más desfavorables para su estabilidad o buen funcionamiento, debido a que se controlan ciertos parámetros que hace posible modelar escenarios que en prototipo, tienen una probabilidad de ocurrencia muy pequeña, como una crecida máxima probable (CMP) o que directamente no deseamos que ocurra, como fallas o rotura de las obras. En la evaluación de obras ya construidas que presentan problemas de diseño o funcionamiento, nos ayuda a representar y analizar con mayor detalle, dichos problemas, para determinar la solución más conveniente, teniendo en cuenta que la intervención de obras en funcionamiento, es compleja e involucran a diversos factores que muchas veces escapan a lo netamente técnico.

En la actualidad debido al avance de la tecnología, se tiene acceso a modelos numéricos de alta prestaciones, que nos permiten realizar los mismos análisis que en los modelos físicos, pero sin requerir de instalaciones físicas importantes. Debido a la complejidad de los fenómenos hidráulicos su representación numérica requiere formulaciones que deben ser validados con datos experimentales o de prototipo para tener resultados confiables y así poder combinar ambos modelos en búsqueda de soluciones optimizadas.

El objetivo de este trabajo es demostrar la utilidad de un modelo físico para el diseño y optimización de una central hidrocombinada, y su utilización para la validación de las simulaciones CFD (computational fluid dynamics).

**Palabras clave:** modelos físicos, modelos matemáticos, central hidrocombinada, optimización.



**Abstract:** the physical models constitute a powerful tool for the design and optimization of complex hydraulic works on operation and implementation. In the project stage it allows to visualize the operation of the future work with the expected design conditions, and others more unfavorable conditions for its stability or good functioning, because we can control certain parameters that makes it possible to model scenarios that in prototype has a low probability of occurrence such as a probable maximum flood (PMF) or other that we don't want to happen, such as damages or collapse of the structure. For the evaluations of existing works with design or functioning problems the physical models allow us to find optimized solutions.

Currently due to the advancement of technology, we have access to high-performance numerical models, which allow us to perform the same analyzes as in physical models, but without large facilities. Due to the complexity of hydraulic phenomena, its numerical representation requires formulations that must be validated with experimental or prototype data.

The objective of this work is to demonstrate the utility of a physical model for the design and optimization of a hydro combined power plant, and its use for the validation of CFD simulations.

**Keywords:** physical model, mathematical models, hydro combined power plant, optimization.

## 1.- INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemoriales la curiosidad del ser humano lo ha llevado a descubrimientos sorprendentes, por la necesidad imperiosa de comprender el comportamiento de todo lo que lo rodea encontrando como primera arma la experimentación. En lo que refiere a los fluidos Leonardo Da Vinci cito “si hablamos del agua, primero la experiencia y luego la razón” dejando implícito lo fundamental de la experimentación para la comprensión de este fluido.

En la actualidad, los modelos físicos se transformaron en una herramienta más para realizar servicios de ingeniería, según Lopardo “las necesidades de la ingeniería la asumen como un arma de verificación y optimización de proyectos, prácticamente ineludible para las estructuras hidráulicas no convencionales” (1).

Por otro lado en la actualidad el avance de la tecnología permitió un mayor desarrollo en el campo de la modelación matemática, con el acceso a computadoras de gran potencia a costos relativamente bajos, que permiten resolver inclusive completamente las ecuaciones de Navier y Stokes en ciertos problemas de mecánica de fluidos mediante el DNS (Direct Numerical Simulation), o bien resolver numéricamente dichas ecuaciones con un cierre turbulento adecuado en problemas de Ingeniería (2).

Si bien la hidráulica experimental tiene extensa aplicación, que se podría remontar más allá de los tiempos de Leonardo Da Vinci (1452 - 1519), sus resultados están sujetos a efectos de escala. Como el paso que sigue al modelo físico, ya es el prototipo, evaluar su grado de incertidumbre requiere de mediciones en escala real, que de acuerdo al parámetro analizar es factible.

Corroborar resultados en modelos físicos con los de prototipo disminuye la incertidumbre, trabajos más recientes, demuestran una buena reproducción en modelo físico del campo de velocidades y de la profundidad de la erosión en pilas, corroboradas con medidas en prototipo (3).

Ahora bien, en una simulación numérica intervienen varios algoritmos matemáticos cuya complejidad dependen del fenómeno que se quiera representar, donde la validación de esos resultados forma parte de la evaluación de la incertidumbre y presentación de los mismos. Por lo dicho anteriormente, los modelos físicos tienen una vasta aplicación en el área de la mecánica de fluidos, lo cual hace que sus resultados validen los proporcionados por simulaciones CFD, en caso que no se tenga acceso al prototipo u obra real. Con un modelo numérico calibrado y validado, se puede expandir el alcance de los resultados, a zonas que en modelo físico e inclusive en prototipo son inaccesibles, como ser la distribución tridimensional de las velocidades en cualquier sección del dominio analizado. Se demostró con medidas en modelo y resultados de simulaciones CFD, buena concordancia en la distribución de velocidades en un plano seleccionado como representativo (4).

Estudios demostraron buenas concordancias entre los resultados de simulaciones CFD, y las mediciones en modelo físico, de la superficie libre, la distribución de las presiones instantáneas, así como el comportamiento general del escurrimiento, en una estructura idéntica al del presente trabajo (5).

Otro parámetro a tener en cuenta en la caracterización de flujos bifásicos macro turbulentos, es la concentración de aire, donde medidas en modelo físico, aun dejan bastante incertidumbre, los resultados de concentración de aire, obtenidos mediante simulación CFD, con mediciones en prototipo, lograron una concordancia aceptable (6). Si consideramos que la mayor limitación para realizar un modelo físico es el alto costo en su implantación, lugar físico, instalaciones y tiempo de construcción, mientras que mayor virtud de un modelo matemático su implementación casi inmediata al disponer de la tecnología necesaria, así como resultados satisfactorios demostrada por su bibliografía, el desafío está en complementar estas dos características para seguir explotando al máximo los potenciales de ambos modelos.

El trabajo muestra un ejemplo donde la utilización de ambos modelos llevaron a una solución optimizada de una central hidrocombinada, capaz de generar potencia mediante la instalación de turbinas bulbo al pie de un vertedero existente,

manteniendo la misma capacidad de erogación para el paso de crecidas.

## 2.- METODOLOGÍA APLICADA

El modelo físico se construyó en las instalaciones del laboratorio de hidromecánica de la Universidad Nacional de la Plata, Argentina, que además adquirió la licencia de un software comercial para las simulaciones CFD (FLOW-3D), por tanto se trabajó con ambos modelos, de acuerdo a las exigencias del estudio.

La posibilidad de contar con ambos modelos, permitió la optimización de la estructura propuesta como solución final donde en etapas iniciales de diseño se modelaron matemáticamente varias alternativas hasta llegar a una geometría final optimizada, figuras 1, 2 y 3 y con esta se procedió a la construcción de un modelo físico bidimensional acotado a un vano de la central para la validación de los resultados y optimización de diseño, la situación modelada se ilustra en la figura 4.

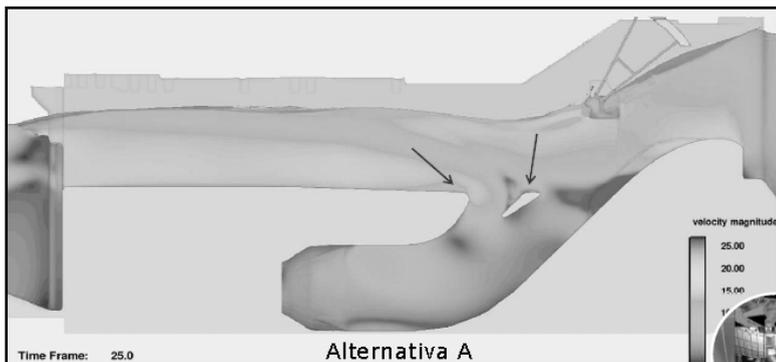


Figura 1: Alternativa modelada, pasaje de la crecida

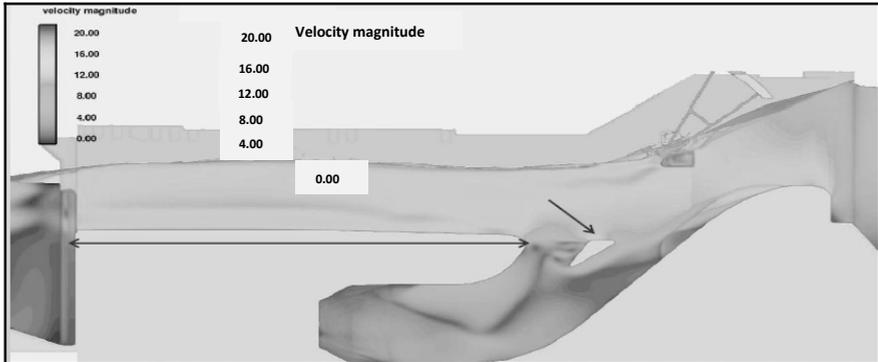


Figura 2: Otra alternativa modelada, pasaje de la crecida

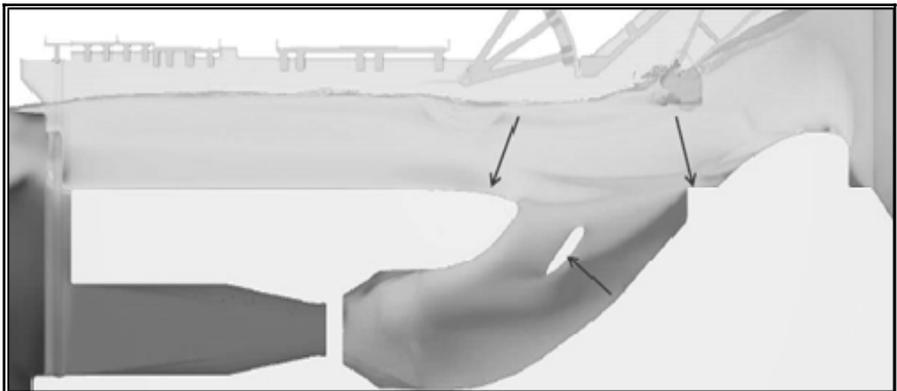


Figura 3: Alternativa cercana a la solución final, geometría del modelo físico construido.

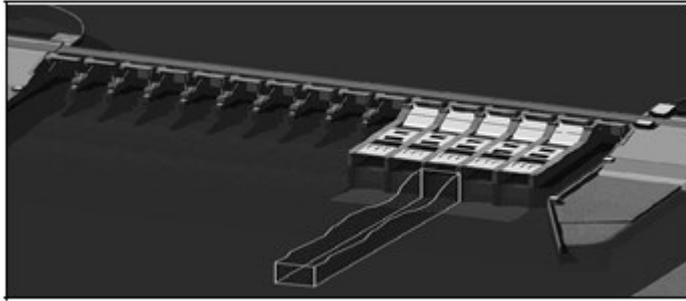


Figura 4: Situación modelada, modelo bidimensional.

### Características del modelo físico

Se construyó el modelo físico de un vano de la futura central, de acuerdo a las semejanzas de Froude, las escalas se muestran en la **tabla 1**, 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 es de acero inoxidable.

La zona del módulo de la central presenta uno de los laterales en acrílico, de manera de permitir 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) están fabricados en chapa de acero inoxidable de espesor de 2 mm, **figuras 5 y 6**.

	Escala	Valor
<b>Escala de Longitudes</b>	$e_L$	<b>40</b>
<b>Escala de Tiempos</b>	$e_T = e_L^{1/2}$	6.32
<b>Escala de Velocidades</b>	$e_V = e_L^{1/2}$	6.32
<b>Escala de Gastos</b>	$e_Q = e_L^{5/2}$	10119
<b>Escala de Presiones</b>	$e_{p/\gamma} = e_L$	40

Tabla1: Leyes de semejanzas de Froude.



Figura 5: Vista lateral modelo físico completo.

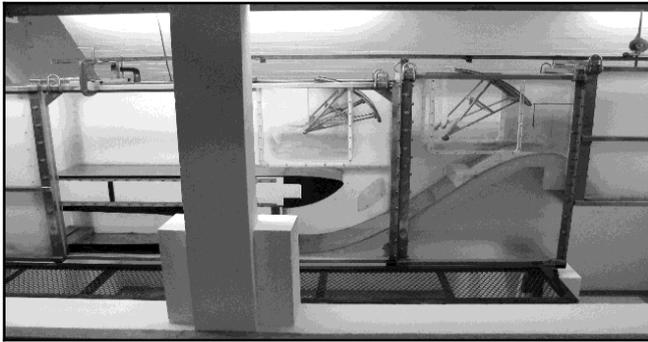
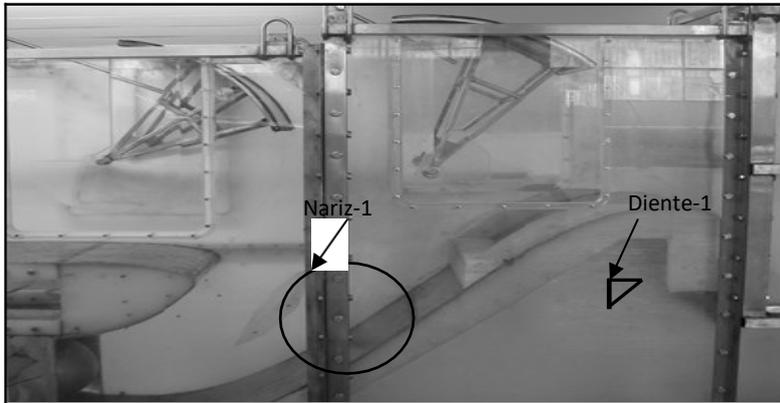


Figura 6: Vista lateral del módulo de la central.

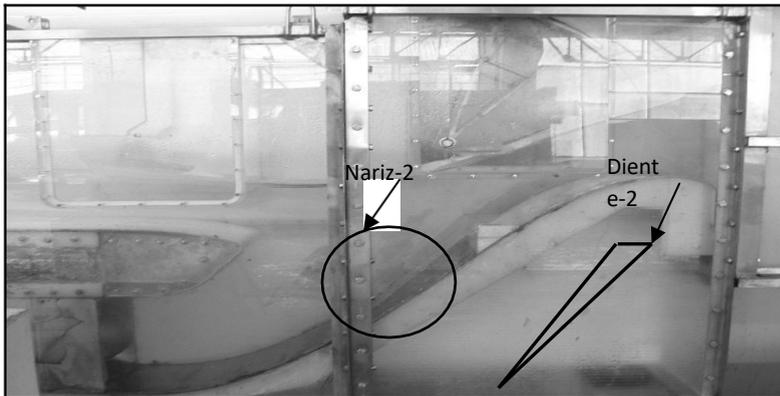
### Ensayos realizados

En la primera etapa, se verificó el paso de la crecida, operando la central como vertedero para el paso de crecidas, atendiendo la influencia de la estructura adicional del vertedero, el diente deflector y la geometría de la nariz de la solera. En el modelo se previó la posibilidad de remover la nariz de la solera para cambiar su geometría, así como el diente deflector para ensayos de diversos escenarios.

En la **figura 7 y 8** se muestra la condición inicial y la solución final propuesta. Las condiciones de borde fueron el nivel del embalse y restitución, así como el caudal erogado. Se relevó el perfil longitudinal del tirante hidráulico así como la medición de presiones fluctuantes en el eje longitudinal de la central, en puntos relevantes previamente establecidos.



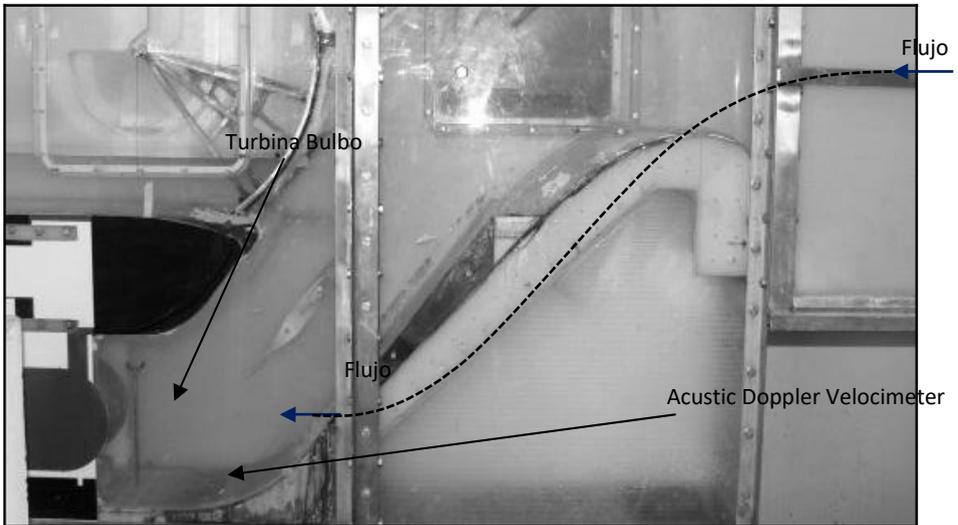
**Figura 7:** Condición inicial, geometría vertedero existente.



**Figura 8:** Propuesta de solución final.

En la segunda etapa se verifico el paso del flujo en la aducción a la máquina, midiendo las velocidades en tres direcciones mediante un velocímetro acústico Doppler (ADV) en un plano perpendicular al pasaje del flujo, **figura 9**.

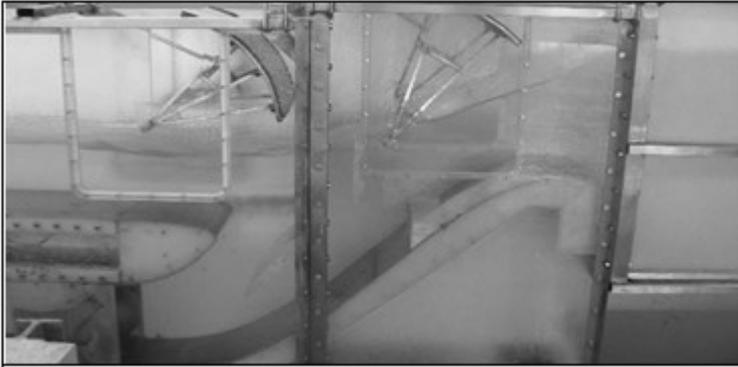
También se realizaron ensayos adicionales como la medición de las presiones fluctuantes en el macizo rocoso en la descarga de la central, determinando las zonas de máximas fluctuaciones de presiones y los posibles efectos sobre el macizo rocoso.



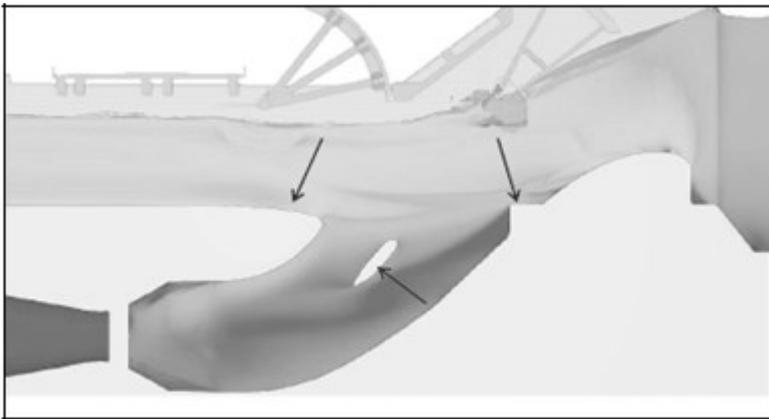
**Figura 9:** Central en generación, medición de velocidades en un plano perpendicular al flujo.

### 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En lo referente a la optimización del diseño de la central hidrocombinada, con el modelo físico se verificó que la geometría del vertedero existente es satisfactoria con el diente deflector de la condición inicial para el paso de la crecida sobre la solera, pero impactando el flujo en los muñones de la compuerta para la crecida, condición que se observó ya en la modelación matemática **figura 10 y 11** validando dichos resultados.



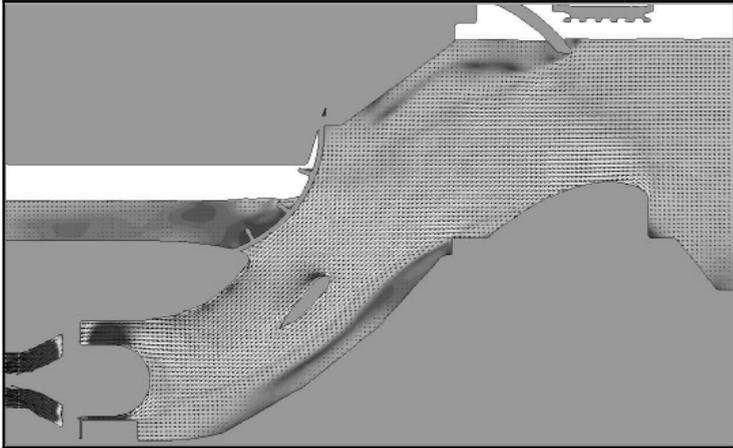
**Figura 10:** Pasaje de la CMP, sobre la central MF.



**Figura 11:** Pasaje de la CMP, sobre la central MM.

Los resultados de las simulaciones matemáticas evidenciaron que si bien esta geometría es aceptable para el paso de la crecida, no es así para la condición de generación, ya que el direccionamiento del flujo hacia la aducción de la maquina no es aceptable para los criterios de diseño **figura 11**, por tanto se tomó la geometría de la **figura 8**, como aceptable para la aducción a la máquina y se verifico el paso de la crecida donde los resultados fueron satisfactorios y no presentaba diferencia con la geometría inicial para el caso.

Luego se pasó a validar los resultados de la modelación matemática en la aducción, midiendo en modelo físico las velocidades en un plano de referencia común para ambos y comparar los resultados ilustrados en la **figura 12, 13 y 14**.



**Figura 11:** Distribución de los vectores de velocidades con la central generando.



**Figura 12:** Medición de un punto con el ADV.

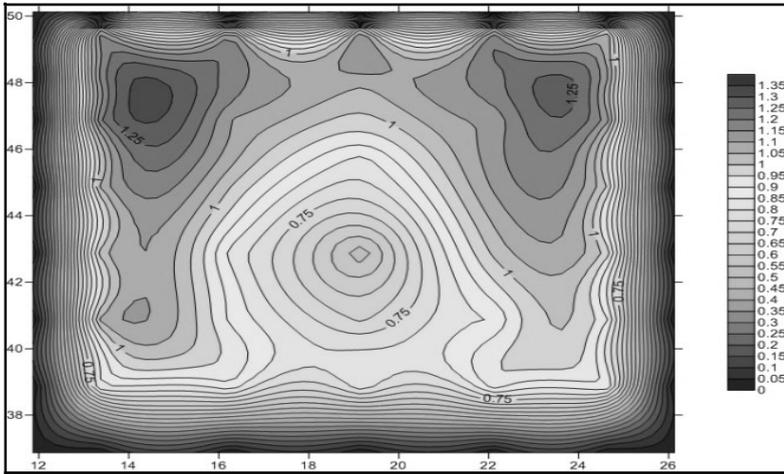


Figura 13: Plano de velocidades medias en la grilla de medición, resultados MF.

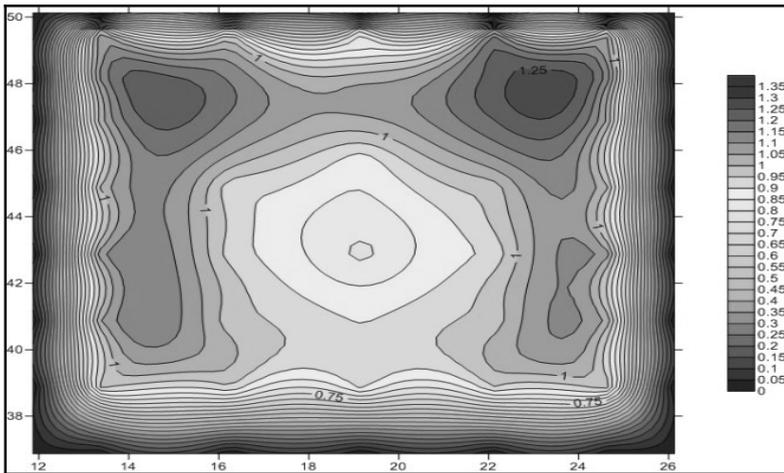


Figura 14: Plano de velocidades medias en la grilla de medición, resultados MM.

#### 4.- CONCLUSIONES

La modelación física es una herramienta poderosa para el diseño, verificación y optimización de grandes obras hidráulicas y la historia del arte demuestra una nutrida trayectoria en la investigación científica, así como para proporcionar soluciones técnicas a problemas existentes o prever futuros.

Teniendo en cuenta su alto costo de implantación, así como la ocupación de grandes instalaciones son pocos los lugares donde se pueden desarrollar y más en nuestro medio, así como tampoco hay un continuo desarrollo de proyectos de ingeniería que ameriten la construcción de un modelo físico y que el mismo sea sustentable en el tiempo.

Con el presente trabajo se buscó mostrar su utilidad, e importancia de sus resultados para el diseño y optimización de obras de gran envergadura y siendo nuestro país rico en recursos naturales tenemos la posibilidad de aprovechar los conocimientos adquiridos por otras universidades para la formación del capital humano idóneo en el tema.

La experiencia nos dice que la universidad debería de ser quien desarrolle los proyectos que justifiquen un modelo físico, ya que además de resolver un problema específico del país, el conocimiento y tecnología queda y los alumnos desde el inicio de la carrera pueden disponer de ellos y palpar la importancia de estudiar los fenómenos físicos orientados a la hidráulica, que tiende a tener formulaciones tediosas que dificultan su comprensión si uno no lo ve, así como formar investigadores en el área de la experimentación hidráulica para sacar el mayor provecho de semejante inversión.

Se demostró también como la interacción entre un modelo físico y matemático llevan a resultados con alto nivel de certidumbre en la solución final de una obra, así como su contribución a la hora de optimizar la geometría destinada a la modelación física permitiendo prever piezas móviles para su remoción de manera casi inmediata para ensayos de diferentes escenarios.

Al tener un modelo matemático validado y un modelo físico optimizado, se tiene una metodología de trabajo conjunta donde si es necesario modelar varios escenarios o geometrías, el modelo físico presenta mayor factibilidad ya que los resultados de una modificación pueden verse casi en el instante, mientras que una simulación matemática podrá llevar horas, días hasta semanas. Así como la modelación matemática complementa los resultados de una modelación física ya que los detalles en la representación son excelentes, abarcando prácticamente cualquier punto estudiado que se desee analizar.

Por consiguiente, la metodología de trabajo propuesta es la optimización del diseño en modelo matemático hasta una solución cercana a una solución final para la construcción de un modelo físico acotado a la zona de interés para la optimización de la misma y validación del modelo matemático.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Lopardo RA. Metodología de estimación de presiones instantáneas en cuencos amortiguadores. *Anales de la Universidad de Chile*.1985;(8):437-455.
2. Silva Freire AP, Menut PM, Su J. Turbulencia. Rio de Janeiro, Brasil: Associacao Brasileira de Ciencias Mecánicas; 2002.
3. Lee OS, Hong HS. Reproducing Field Measurements Using Scaled-Down Hydraulic Model Studies in a Laboratory. *Advances in Civil Engineering*. 2018. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/9091506>
4. Angulo M, Liscia S, Lopez A, Lucino, C. Experimental Validation of a low-head turbine intake designed by CFD following Fisher and Franke guidelines. *Anales del Congreso 27th IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Systems*. Montreal; 09/ 2014.
5. Duró G, De Dios M, López A. Physical modeling and cfd comparison: case study of a hydro-combined power station in spillway mode. *Annals 4th International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures*. Logan, Utah, 06/ 2012.
6. Aydin MC, Ozturk M. Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillways aerators. *Canad. J Civil Eng*. 2009;36(5):826-836.
7. Liscia S, Angulo M, Ruiz Díaz A, Lugo MV. Estudio de una Obra de Desvío mediante Modelación Matemática. *Anales XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, AIIH San José, Costa Rica*; 2012.
8. Liscia S, Angulo M, Lugo M. V. Modelación física y matemática de una obra de derivación. *Anales XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Punta del Este, Uruguay; 2010.
9. Liscia S, Angulo MA, De Dios M, Del Blanco M. Modelación matemática y física de un vertedero modificado. *Anales XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Punta del Este; 2010.
10. Vallarino E. Tratado Básico de Presas: Aliviaderos. Construcción y Explotación de Presas. Tomo II. Madrid: Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid; 1998.
11. Flow Science Inc. Flow 3D. User Manual. Vesion 9.3. 2008. Disponible en <https://www.flow3d.com/>