

MODELACIÓN MATEMÁTICA APLICADA

AL ESTUDIO DE ESTACIONES DE BOMBEO

Liscia Sergio O., Lucino Cecilia V., Duró Gonzalo

Laboratorio de Hidromecánica, Departamento de Hidráulica, Universidad Nacional de La Plata
Calle 47 N°200 (C.P. 1900) La Plata. Email: soliscia@ing.unlp.edu.ar

Palabras claves: CFD, estaciones de bombeo, vórtices

Introducción:

El Laboratorio de Hidromecánica ha estado sosteniendo una línea de investigación sobre la viabilidad en la aplicación de modelos matemáticos para la representación de las características del flujo en estaciones de bombeo y en particular de vórtices en dársenas. La posibilidad de anticipar la ocurrencia de estos fenómenos en las obras de impulsión de agua es de suma importancia debido a que su presencia puede significar el deterioro temprano de las unidades de bombeo y en situaciones aún peores la imposibilidad de operar las mismas.

La modelación matemática se presenta para ello como una herramienta interesante de análisis ya que dispone de ciertas ventajas respecto de la clásica herramienta que es la modelación física.

Las principales ventajas de la modelación mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) son la fácil y rápida identificación de fenómenos vorticosos, la posibilidad de visualizar en cualquier parte del escurrimiento y en cualquier instante los vectores de velocidad con sus tres componentes así como el campo de presiones, y los costos y plazos de aplicación más reducidos que la modelación física.

Hasta el momento, la modelación matemática no puede reemplazar la modelación física debido a sus limitaciones, principalmente en cuanto a la capacidad de procesamiento de los CPU y a los modelos de turbulencia que tienen limitaciones en la representación de todas las escalas de la misma, pero es sin duda una herramienta muy útil para complementar la modelación física.

Trabajo experimental:

El trabajo se basó en la correspondencia de la ubicación y estructura de distintos tipos de vórtices visualizados sobre un modelo físico con las vorticidades que pudieran ser identificadas en la modelación de CFD. La construcción y operación del modelo físico estuvo a cargo del grupo de trabajo de Jun Matsui en Japón.

Así mediante el software comercial FLOW-3D se simularon las mismas condiciones de ensayo utilizadas en el modelo físico, para luego ver si los vórtices que se identificaron se representaban satisfactoriamente mediante este modelo matemático.

A) Modelo CFD

El software FLOW-3D®, desarrollado por Flow Science Inc. de Estados Unidos, es un programa de simulación de flujos basado en la resolución numérica por volúmenes finitos de las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. Consta también de varios módulos complementarios para la resolución de distintos problemas tales como el transporte de sedimentos, cuerpos sólidos en movimiento, escurrimiento en medios porosos, etc. El modelo representa la ubicación de la superficie libre mediante el método VOF (volume of fluid) y posee el método FAVOR® para la determinación de los contornos sólidos.

Para la simulación de la dársena se utilizaron tres mallas de celdas cúbicas conectadas entre sí. En primer lugar se dispuso una malla de celdas de ocho milímetros de lado en la zona del canal de aproximación a la bomba. Luego se colocó una malla de celdas de cuatro milímetros de lado en la zona de la bomba donde era de interés el análisis más detallado del escurrimiento. Por último, se ubicó una malla de celdas también de 4 mm de lado en la parte superior de la bomba para imponer la condición de borde del caudal objetivo. A modo de aclaración, sólo se utilizó una malla de 4 mm. en el entorno de la bomba con el fin de disminuir la cantidad de celdas totales, ya que el número de éstas tiene una influencia directa en el tiempo de corrida de la simulación.

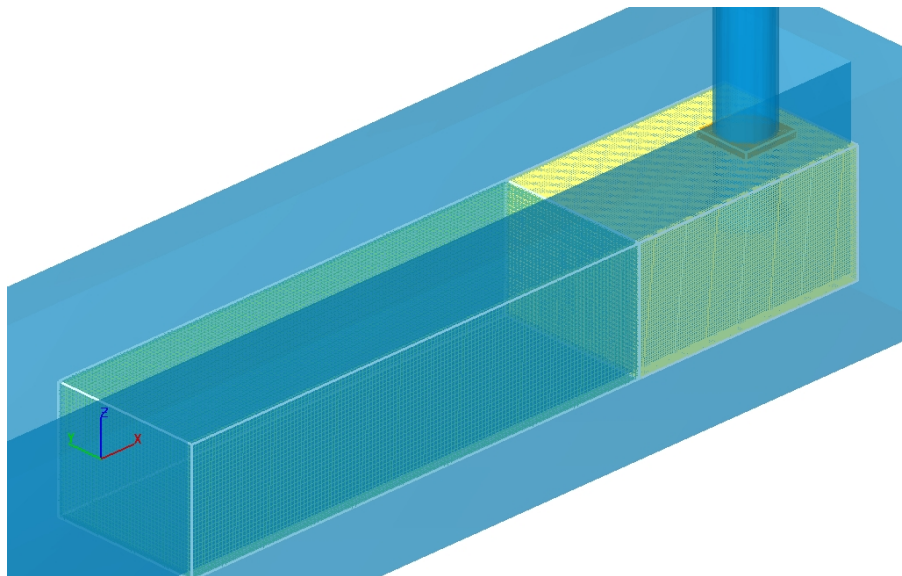


Figura 1.- Mallas utilizadas en la modelación

En suma, la cantidad de celdas de las mallas fueron de 167680 para la de 8mm, 655360 para la de 4mm y 3600 para la otra de 4mm dispuesta para imponer la condición de borde.

La longitud modelada del canal se estableció observando previamente cuál era la mínima distancia en la que se desarrollaba totalmente la capa límite antes de la llegada del flujo a la bomba, ya que el flujo en el ingreso al dominio posee una distribución de velocidades uniforme en el espacio.

La condición de borde a la entrada del dominio consistió en un nivel de energía total igual al nivel de agua buscado en la dársena más 3 milímetros. Esto último considera la pérdida de energía hasta la llegada a la bomba.

La condición de borde de aguas abajo se estableció como un caudal saliente constante en el tiempo (ubicada en la cara superior de la malla anaranjada de la **Figura 1**). Se consideró al fluido como monofásico y el agua se consideró incompresible, con una temperatura de 20°C. Los modelos físicos activados fueron el de gravedad y el de turbulencia. La aceleración de gravedad fue de 9.81 m/s² y el modelo de turbulencia empleado fue el de grandes vórtices (LES o Large Eddy Simulation). Se utilizó un tercer orden para aproximar la advección de la cantidad de movimiento y el método de advección del VOF fue el Split Lagrangian.

B) Observación de vórtices

El aspecto de interés prioritario en esta indagación ha sido explorar las posibilidades de la simulación CFD para identificar los diferentes tipos de estructuras vorticosas que aparecen en una dársena de bombeo.

El flujo a superficie libre, confinado en la geometría de una dársena típica de bombeo, presenta ciertas particularidades. Por un lado se encuentra la interfase agua-aire, restringida por la forma de los contornos físicos de las paredes que le imprimen cambios de dirección y por la propia bomba, que se presenta como un obstáculo para la porción del flujo superficial que no es conducido en forma directa a la aspiración sino que se dirige hacia el espacio ubicado detrás de la bomba. En ciertas condiciones, el flujo se organiza en forma de vórtices superficiales, en forma de estructuras coherentes, con distintos grados de estabilidad, dependiendo de la sumergencia y de las características de flujo de aproximación.

Por otra parte, el flujo sumergido se ve sometido a los cambios de dirección y magnitud de la velocidad impuestos por el bombeo y la geometría de los contornos sólidos, y en este proceso, en el cual se inducen localmente flujos con componentes de circulación, la capa límite de las superficies de contacto provee vorticidad adicional al flujo, formando vórtices de pared y de fondo que llegan a ser muy estables. A diferencia de los superficiales, la presencia de estos vórtices sumergidos no depende en forma directa de la sumergencia, aunque sí se ha medido que el aumento de la velocidad del flujo (que puede darse con menor sumergencia a igual caudal) puede llevar a estados de cavitación a los vórtices de fondo (Iwano, 2002). El grado de depresión local que alcanzan los vórtices de fondo cuando se alcanzan velocidades límites conlleva la aparición de la cavitación en su núcleo, que ingresa a la aspiración con consecuencias negativas para la bomba.

En diseños de geometrías complejas se combinan efectos provenientes de la ausencia de uniformidad en el perfil de velocidades del flujo de aproximación, con factores propios de la geometría, sumergencia y guiado del flujo en el entorno de la propia bomba. En estos casos, resulta complejo analizar los múltiples factores que se superponen para dar como resultado un funcionamiento ineficiente del conjunto y resulta laborioso y costoso buscar medidas correctivas. Por esta razón se propone explorar técnicas de visualización de estructuras vorticosas en una geometría sencilla, de la que se tienen datos experimentales para validar sus resultados.

C) Ensayo de referencia

Se tomó como referencia el ensayo en modelo físico presentado por Matsui (2006) y Okamura (2007) que consta de una geometría sencilla, con la bomba implantada con una excentricidad del 3% del ancho de la dársena respecto al eje geométrico de la misma (**Figura 2**). El trabajo documenta la comparación de valores medidos y observados con resultados numéricos utilizando diferentes códigos de cálculo. La medición se realizó utilizando la técnica PIV (Particle Image Velocimeter). Se presentan valores de velocidad, vorticidad, permanencia y ubicación de los vórtices. De la publicación mencionada se han tomado solamente los datos medidos en el modelo físico, dejando de lado la comparación con otras simulaciones por cuestiones de limitaciones en el alcance de este trabajo.

Se reproducen los resultados de una primera etapa, que es la correspondiente al siguiente estado ensayado: caudal bombeado de $1 \text{ m}^3/\text{min}$ y tirante de 230mm. También se presentan las primeras observaciones del funcionamiento con un tirante de 150 mm, con el objetivo de anticipar las tendencias que arroja la simulación y su coincidencia con los valores medidos.

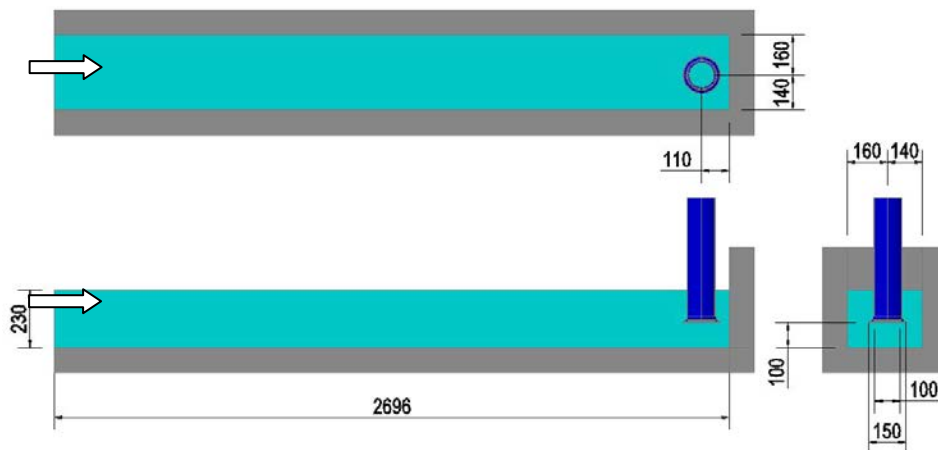


Figura 2.- Geometría del modelo físico de referencia (Matsui, 2007)

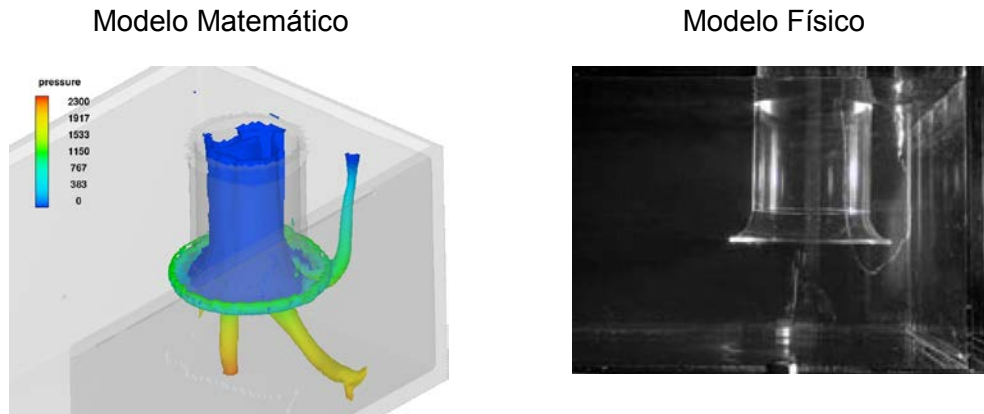
Las condiciones de borde utilizadas fueron: nivel de agua constante igual a 230mm en el ingreso, y en la sección superior de la bomba, un caudal de impulsión constante de $1 \text{ m}^3/\text{min}$.

El tiempo de cálculo plantea una restricción concreta por lo cual debe procurarse encontrar un tamaño de malla que represente los fenómenos que se espera analizar con un tiempo de procesamiento razonable. Para este fin, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Se realizaron dos simulaciones en forma consecutiva: la primera con una malla estructurada de celdas cúbicas de 8 milímetros de lado para llegar al estado de

régimen normal. De esta simulación se tomó el perfil de velocidades como condición inicial en el ingreso para una segunda etapa de simulación con una malla de 4 mm de lado, de 60 segundos de duración. A partir de esta corrida se realizó el post-procesamiento de datos y se obtuvieron resultados que se presentan más adelante.

- b) Se realizó una simulación de 400 segundos con malla de 8 mm para apreciar la variación temporal de la vorticidad en el entorno de la bomba. El post procesamiento de los datos en forma de animación permitió comparar la ubicación de los vórtices observada en modelo físico respecto de la simulada.



Figuras 3 y 4.- Dársena de prueba en modelación matemática y física

Resultados:

Los resultados de la investigación han sido satisfactorios y ha posibilitado el empleo de las técnicas de identificación de vórtices y la caracterización del flujo de aducción a las bombas en trabajos de transferencia.

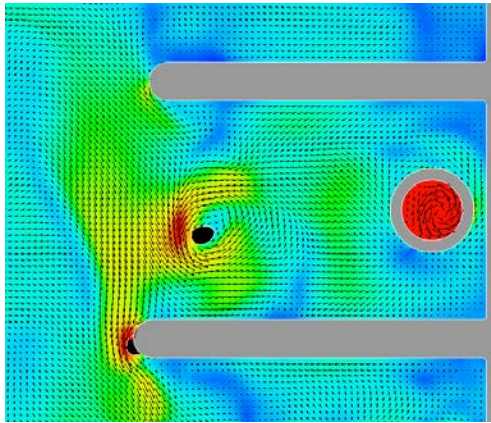
Los trabajos más relevantes en los que fueron aplicadas estas herramientas consistieron en la modelación de dos estaciones de bombeo completas de impulsión de agua cruda y agua potabilizada. Éstas son parte de la planta potabilizadora de agua Paraná de las Palmas en el partido de Tigre, actualmente en construcción.

Las modelaciones matemáticas de las estaciones fueron hechas paralelamente a las respectivas modelaciones físicas. Esto ha permitido verificar nuevamente la confiabilidad del recurso empleado ya que los fenómenos hidrodinámicos fueron identificados en ambas modelaciones. Por otro lado, ha posibilitado comprobar que distintos diseños de las obras proyectadas se encontraran en condiciones satisfactorias de operación, confluyendo así a soluciones más adecuadas y optimizadas de diseño.

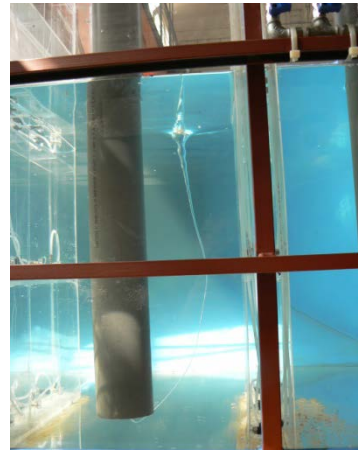
A continuación se presentan los resultados de las modelaciones matemáticas de las estaciones de bombeo en las que se aplicó la metodología expuesta.

- A) Estación de bombeo de agua tratada:

Modelo Matemático

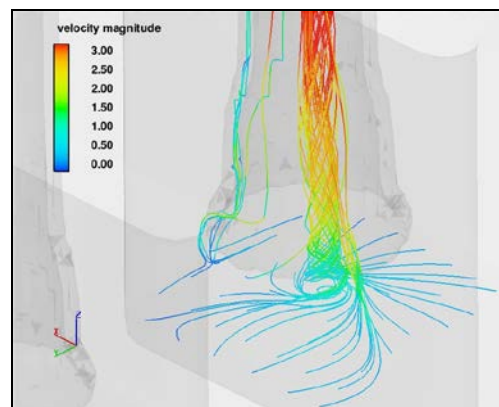
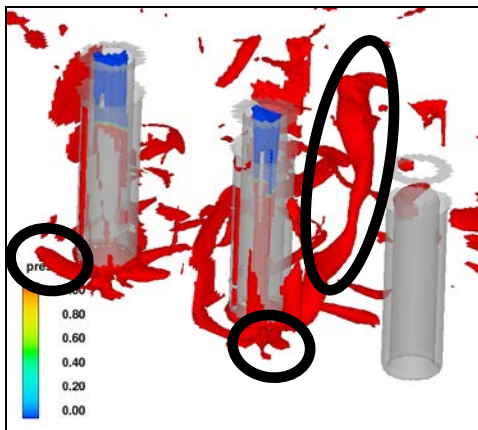


Modelo Físico



Figuras 5 y 6.- Vórtice de superficie representado en la modelación matemática y física

En la imagen precedente de la izquierda se visualiza el campo de velocidades del modelo matemático. Éste presenta una depresión de la superficie libre (coloreada en negro) alrededor de un claro patrón de circulación frente a la bomba. En la imagen del modelo físico se puede observar que efectivamente se trataba de una vorticidad francamente desarrollada con entrada de aire.



Figuras 7 y 8.- Dársena de prueba en modelación matemática y física

En las **figura 7** se pueden ver vorticidades de distinto origen identificadas por los círculos negros, de izquierda a derecha, vórtices de pared, fondo y superficie respectivamente. En la **figura 8** se identifica un vórtice de fondo mediante líneas de corriente que están coloreadas por la magnitud de la velocidad.

B) Estación de bombeo de agua tratada:

En esta estación también se utilizó la metodología presentada pudiéndose identificar las vorticidades de fondo y pared en las dársenas de las bombas. La siguiente imagen muestra estructuras vorticosas que luego fueron suprimidas con modificaciones en el diseño hidráulico.

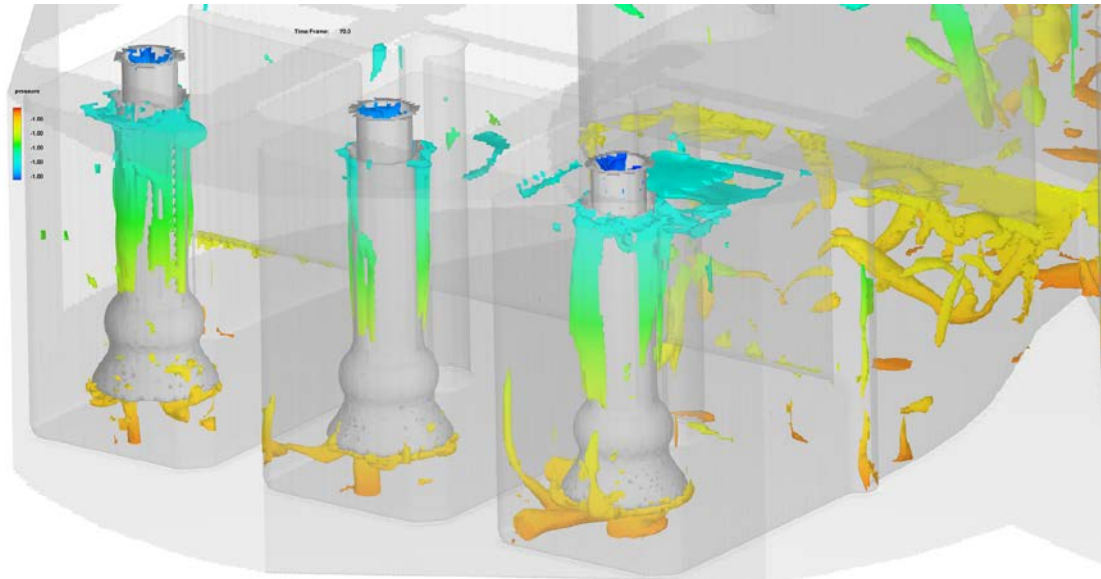


Figura 9.- Vórtices de fondo y de pared en las dársenas

Adicionalmente, las técnicas de visualización de vórtices sumergidos, cuya identificación en modelos físicos es dificultosa, se utilizaron en otro proyecto de importancia que consiste en una estación de bombeo cuya aducción se encuentra a presión. La obra en cuestión está situada en los Emiratos Árabes y posee una escala similar a las presentadas anteriormente. En este caso se modelaron varios diseños para arribar a una solución adecuada respecto del flujo de aducción y sin la presencia de vórtices o circulaciones significativas en la entrada de las bombas.

Conclusiones:

La herramienta utilizada para la caracterización de flujos y de vórtices en particular ha resultado exitosa. En lo sucesivo se pretende continuar la línea de investigación buscando optimizar los tiempos de modelado, caracterizar las intensidades de los vórtices para detectar el potencial ingreso de aire y emplear otras técnicas de visualización, mediante el código de simulación ya empleado y uno adicional cuya características prometen complementarse en forma óptima con las actualmente utilizadas.

Bibliografía:

- [1] **Okamura T., Kyoji K. and Matsui J.** (2007). "CFD Prediction and Model Experiment on Suction Vortices in Pump Sump".
- [2] **Matsui J., K. , Okamura T.** (2006). "CFD Benchmark and a Model Experiment on the Flow in a Pump Sump".
- [3] **Chen Y., Wu Ch., Ye M., Ju X.** (2007) "Hydraulic Characteristics of Vertical Vortex at Hydraulics Intakes".
- [4] **Tokyay, T. and Constantinescu, S.G.** (2005), "Large Eddy Simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry. II: Investigation of dynamics of coherent structures".
- [5] **Nagahara, T., Sato T., Okamura T.** (2003), "Measurement of the Flow around the Submerged Vortex Cavitation in a Pump Intake by Means of PIV", Fifth International Symposium on Cavitation. Osaka. Japan. P 1-7
- [6] **Iwano, R., Shibata T.** (2002). "Numerical prediction method of submerged vortex and its application to the flow in pump sumps and without a baffle plate".