

DESARROLLO DE CAPACIDADES LOCALES DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TURBINAS HIDRÁULICAS: UN CASO DE VALIDACIÓN

Lucía Charbonnier^a, Camilo Fernández^a, Bruno López^a y Rodolfo Pienika^a

^aUniversidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Montevideo, Uruguay.

<https://www.fing.edu.uy/imfia>

lcharbonnier@fing.edu.uy, cfernandez@fing.edu.uy, brunolop@fing.edu.uy, rpienika@fing.edu.uy

INTRODUCCIÓN

La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) constituye una herramienta cada vez más utilizada para el estudio y el desarrollo de turbomáquinas hidráulicas. Su aplicación permite analizar el comportamiento de los equipos mediante modelos numéricos que complementan y amplían la información obtenida a partir de ensayos experimentales. Además, el uso de CFD ofrece un punto de partida para la construcción de metodologías de simulación aplicables al diseño, la evaluación y la optimización de turbinas en distintas condiciones de operación.

Debido a cambios en el uso del recurso hídrico aguas abajo de una central hidroeléctrica en Uruguay, surgió el interés en estudiar los efectos de la operación de las turbinas con saltos menores al mínimo de diseño. Dichas turbinas son de tipo Kaplan, de potencia máxima de 38 MW y saltos entre 16m y 28m. Para realizar este estudio, se propuso la modelación numérica de las turbinas mediante el software comercial TCAE (CFD Support), que se caracteriza por estar basado en software de código abierto, como OpenFOAM y Paraview. Además, incluye herramientas de pre y posprocesamiento dedicadas a la simulación de turbomáquinas. Análisis similares se han reportado en la literatura, por ejemplo, Vu et al. (2010), Iovănel (2022) y Krzemianowski y Kaniecki (2023).

En este trabajo se presenta la validación del módulo de CFD de TCAE, utilizando como caso de validación una turbina de hélice (Pienika, 2022) que fue ensayada previamente en un banco de turbinas de bajo salto (Rovira, 2023), instalado en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería-UdelaR. Se realizó un análisis de sensibilidad al refinamiento en

la malla y al paso temporal, empleando los resultados experimentales obtenidos en el banco de ensayos de turbinas (Villemur y Pienika, 2025).

Esta etapa constituye un paso inicial en la implementación y verificación de la herramienta de simulación para su uso futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Geometría

La turbina simulada es un modelo a escala de una turbina axial de álabes fijos, de 235 mm de diámetro y 750 rpm de velocidad nominal. La turbina modelo está montada en el banco de ensayos de la fig. 1. Se simuló la sección del banco comprendida entre los dos puntos de medición de carga (figura 1); la misma consiste en un tramo de cañería recto, seguido por una pieza en S por la que sale el eje del rodete y se conecta al generador eléctrico, inmediatamente antes del rodete se encuentran los álabes distribuidores, y aguas abajo del rodete se tiene un tubo difusor desde el cual se hace la descarga.

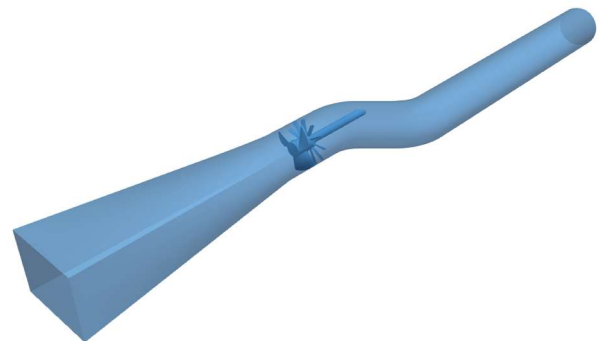


Figura 1.- Geometría del banco de ensayos.

Parámetros de Simulación

Con el objetivo de analizar la sensibilidad del modelo y asegurar la consistencia de los resultados, se evaluaron diferentes configuraciones en tres aspectos principales:

Malla: se probaron dos niveles de refinamiento distintos (8,1 y 12,9 millones de celdas aproximadamente), siendo más finas las mallas en las zonas del rodeté y del distribuidor.

Paso temporal: se analizaron dos valores de paso (8×10^{-4} s y 2×10^{-3} s) para comprobar la estabilidad de la simulación.

Puntos de Operación: se realizaron simulaciones en tres puntos de operación distintos, para los cuales se contaba con datos experimentales, variando tanto el caudal como la velocidad de giro.

Tiempo de simulación: se extendió el período de cálculo para verificar la estabilidad de los valores medios obtenidos.

Los resultados numéricos se compararon entre sí y con los datos experimentales de potencia, salto y eficiencia, obtenidos en el banco de ensayos, a fin de evaluar el grado de concordancia entre el modelo y la realidad experimental.

Las simulaciones fueron realizadas en la infraestructura de cómputo de alto desempeño ClusterUY (Nesmachnow S., Iturriaga S., 2019)

RESULTADOS

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos con la malla de 12,9 millones de celdas y un paso temporal de 2×10^{-3} s, comparados con los del ensayo experimental. Los resultados obtenidos con la otra malla y con otros pasos temporales no difieren significativamente (ver Figura 2). Se observa que los errores relativos en la carga y la potencia se encuentran en el orden del 10%, mientras que el error de la eficiencia supera el 20%. Cabe destacar que la potencia medida en el ensayo incluye las pérdidas mecánicas en los cojinetes, que no se modelan en las simulaciones. La diferencia de signo entre el error relativo de la carga y la potencia refleja que las pérdidas de carga en las tuberías no están siendo correctamente capturadas por el modelo numérico.

Tabla 1.- Resultados de simulación y ensayo experimental, y el error relativo.

Magnitud	Ensayo experimental	Simulación numérica	Error [%]
Salto [m]	0,87	0,78	-10,3
Eficiencia	0,57	0,69	21,1
Potencia [W]	520,01	566,95	9,0

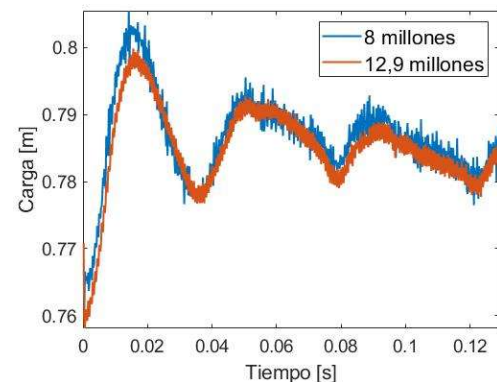


Figura 2.- Comparación de resultados de carga entre dos mallas.

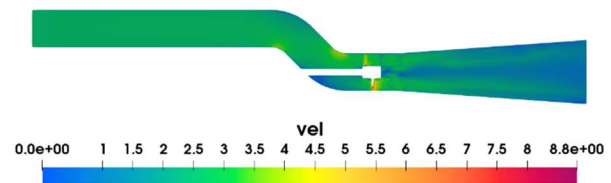


Figura 3.- Campo de velocidades en corte horizontal.

En la Figura 3 se observa el campo de velocidades en un plano horizontal meridional del banco de ensayo, obtenido en una de las simulaciones.

CONCLUSIONES

Se realizó de forma preliminar un estudio de la sensibilidad a la malla y al paso temporal del modelo numérico; sin embargo, el trabajo aún está en curso. Los siguientes pasos serán ajustar la malla para mejorar la resolución en las tuberías lejos del rotor, aumentar los tiempos de simulación y analizar distintos modelos de turbulencia.

La correcta validación del software TCAE permitirá abordar el estudio de las turbinas Kaplan de la central hidroeléctrica con mayor confiabilidad y reducir las incertidumbres.

REFERENCIAS

- CFD Support. (s. f.). *CFD Support*. Recuperado de <https://www.cfdsupport.com/>.
- Nesmachnow S., Iturriaga S. (2019) Cluster-UY: Collaborative Scientific High Performance Computing in Uruguay. In: Torres M., Klapp J. (eds) Supercomputing. ISUM 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 1151. Springer, Cham.
- Krzemianowski, Z., & Kaniecki, M. (2023). Low-head high specific speed Kaplan turbine for small hydropower – design, CFD loss analysis and basic, cavitation and runaway investigations: A case study. *Energy Conversion and Management*, 276, 116558.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116558>
[OUCI+1](#)
- Iovănel, R. G. (2022). *Numerical Modelling of a Kaplan Turbine at Different Operating Conditions: Model and Prototype* (Tesis doctoral). Luleå University of Technology.
<https://doi.org/10.1088/...> [ISBN 978-91-8048-171-7] [DIVA Portal+1](#)
- Vu, T. C., Koller, M., Gauthier, M., & Deschênes, C. (2010). Flow simulation and efficiency hill chart prediction for a Propeller turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Pienika, R. (2022). Desarrollo de tecnologías para micro-aprovechamientos hidroeléctricos de bajo salto [Tesis doctoral, Universidad de la República].
- Rovira, I. (2023). Construcción de banco de ensayos de turbinas hidráulicas y ensayo de modelo a escala de turbina axial. [Tesis de maestría, Universidad de la República]