

APLICACIÓN DE OPENFOAM EN EL ANÁLISIS CFD DE BOMBAS HIDRÁULICAS: ENFOQUE METODOLÓGICO

Victor Hidalgo¹, Melany Chávez¹, Fernando Taco², Mateo Narváez¹, Baoshan Zhu³

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito 170517, Ecuador; victor.hidalgo@epn.edu.ec, melany.chavez@epn.edu.ec, mateo.narvaez@epn.edu.ec.

2. Carrera de Pedagogía Técnica de la Mecatrónica, Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación, Universidad Central del Ecuador, Quito 170129, Ecuador; jtaco@uce.edu.ec.

3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; bszhu@tsinghua.edu.cn.

INTRODUCCIÓN

El estudio de bombas hidráulicas mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) constituye una herramienta esencial para comprender su comportamiento y optimizar su desempeño en diferentes condiciones de operación. OpenFOAM, como plataforma de simulación de código abierto, ofrece una alternativa accesible y flexible para el modelado de este tipo de máquinas, permitiendo analizar campos de velocidad, presión y otras variables relevantes asociadas al flujo interno.

El presente trabajo tiene como propósito exponer una metodología de análisis CFD aplicada a bombas hidráulicas, haciendo énfasis en los pasos principales del proceso: preparación de la geometría, generación de la malla, definición de condiciones de frontera, configuración de modelos de turbulencia y postprocesamiento inicial de resultados. La metodología planteada está orientada a una aplicación más amplia, que incluirá el estudio detallado del desempeño hidráulico y estructural de bombas turbina.

En este sentido, el desarrollo de la presente metodología abre la posibilidad de futuras aplicaciones prácticas, particularmente en proyectos de aprovechamiento hidroenergético en Ecuador, como el caso de las bombas turbina en la zona de Mazar-Amaluza.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló mediante simulaciones en OpenFOAM, orientadas a analizar el comportamiento hidrodinámico de la bomba-turbina del sistema Mazar-Amaluza. La metodología se estructuró en tres etapas principales: pre-proceso (mallado y definición del dominio), simulación (modelos físicos y numéricos) y posprocesamiento de resultados.

Mallado y dominio computacional
El mallado constituye uno de los aspectos críticos

en la simulación de turbomáquinas. Para este estudio se construyó un mallado híbrido con predominio de celdas hexaédricas en el volumen principal y prismas en la zona próxima a las superficies sólidas, con el fin de resolver adecuadamente la capa límite. El refinamiento local se aplicó en la región de los álabes y en la zona de interacción rotor-estátor, garantizando valores de y^+ dentro del rango recomendado para la aplicación de wall functions. El mallado se generó mediante snappyHexMesh y posteriormente manipulado con topoSet para aislar regiones específicas y facilitar el cálculo de fuerzas hidráulicas sobre los álabes. La calidad de las celdas se evaluó en términos de ortogonalidad y skewness, manteniendo los parámetros dentro de los límites aceptables para asegurar estabilidad numérica.

Tratamiento de la rotodinámica

La interacción entre las partes móviles y estacionarias de la bomba-turbina se representó con dos aproximaciones complementarias:

Frozen Rotor (MRF, estacionario-congelado): permite obtener un campo de flujo estacionario al imponer un marco de referencia rotatorio en el rodete. Este enfoque ofrece una estimación inicial de la distribución de presión y velocidad con bajo costo computacional, útil para análisis de diseño preliminar.

Sliding Mesh con AMI (Arbitrary Mesh Interface): resuelve la interacción transitoria entre el rotor y el estator mediante mallas deslizantes acopladas en interfaces arbitrarias. Esta aproximación, aunque más costosa en tiempo de cómputo, resulta esencial para estudiar fenómenos dependientes del tiempo, como fluctuaciones periódicas de presión, pulsaciones de caudal y cargas hidráulicas no uniformes sobre los álabes.

Modelos de turbulencia y modelos físicos

El fluido se modeló como agua incompresible de densidad constante y viscosidad

dependiente de la temperatura de operación. Para la modelación de turbulencia se consideraron dos enfoques dentro de la familia RANS:

Modelo k- ϵ realizable: presenta robustez numérica y buena capacidad de predicción en flujos con recirculaciones amplias y mezclado fuerte, características presentes en el paso de los álabes y en la voluta. Este modelo tiene la ventaja de requerir menor refinamiento en la capa límite y suele ofrecer estabilidad en condiciones de operación variadas, lo que lo convierte en una alternativa atractiva para estudios de eficiencia global.

Modelo k- ω SST: está especialmente recomendado para turbomáquinas debido a su mayor precisión en zonas con gradientes de presión adversos y separación de capa límite. Sin embargo, su sensibilidad a la calidad del mallado y la necesidad de un control riguroso del y^+ pueden incrementar las demandas computacionales.

En este trabajo se direcciona la simulación hacia el uso del modelo k- ϵ realizable, ya que permite capturar con eficiencia el comportamiento hidrodinámico global de la máquina y facilita la construcción de las curvas características, objetivo principal de este estudio. No obstante, el contraste con simulaciones bajo k- ω SST se considera de valor para validar la fidelidad local de los resultados, en especial en el análisis de pérdidas y zonas críticas de separación.

Condiciones de frontera

En la entrada se aplicó un caudal másico mediante la condición `flowRateInletVelocity`, mientras que en la salida se fijó una presión estática de referencia (`fixedValue`). Las superficies sólidas del rodete y la carcasa se trataron con condición de no deslizamiento (`noSlip`), y las interfaces rotor-estátor se acoplaron con AMI.

Postprocesamiento preliminar

El análisis de resultados se realizó en ParaView y utilitarios de OpenFOAM. En esta etapa inicial se concentran los esfuerzos en la visualización de campos de velocidad y presión para asegurar que los valores se estabilicen y que la simulación represente correctamente el flujo. El cálculo de fuerzas sobre los álabes se realizó mediante `forces` y `topoSet`, lo que permitió identificar la distribución de cargas hidráulicas y evaluar su impacto sobre la eficiencia y la estabilidad operativa de la máquina. Su finalidad es

el de interpretar los fenómenos internos y apoyar la toma de decisiones en el diseño y optimización de la máquina.

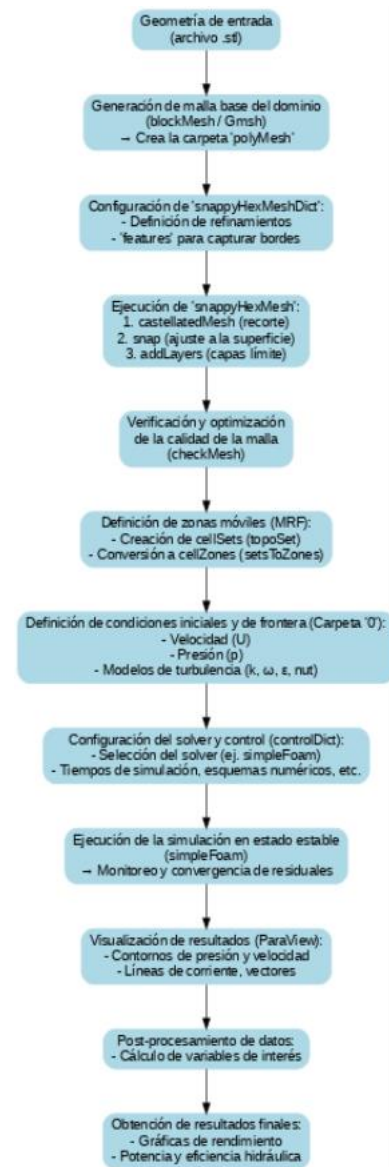


Figura 1. Diagrama de flujo (metodología)

RESULTADOS

En esta etapa se presentan resultados preliminares orientados a la validación del mallado y la configuración inicial del caso en OpenFOAM. El dominio computacional fue discretizado con una malla híbrida, priorizando elementos hexaédricos en el flujo principal y prismas en la proximidad de los álabes. La evaluación de la calidad mostró que los indicadores de skewness y ortogonalidad

permanecen dentro de los rangos aceptables, garantizando estabilidad numérica.

Mediante el uso de topoSet se definieron subconjuntos de celdas y superficies de interés, lo que permitió extraer magnitudes de fuerza hidráulica sobre los álabes y preparar el posprocesamiento posterior de las curvas características.

Inicialmente, el flujo se resolvió bajo condiciones laminares con el objetivo de verificar la consistencia del mallado y la estabilidad del esquema numérico. Esta aproximación permitió identificar la distribución global de velocidades y presiones en el rodete, constituyendo una primera aproximación al comportamiento hidrodinámico de la máquina. Sin embargo, dado que la bomba-turbina opera en regímenes de número de Reynolds elevados, la transición a modelos de turbulencia es indispensable para obtener resultados físicamente más representativos.

En la siguiente fase, las simulaciones se extenderán a regímenes turbulentos empleando modelos RANS, con especial interés en el modelo $k-\epsilon$ realizable y en la comparación con $k-\omega$ SST. Estos permitirán capturar fenómenos como la recirculación en la zona de succión, la separación de flujo en la descarga y las fluctuaciones periódicas asociadas a la interacción rotor-estátor. Los resultados obtenidos en régimen laminar constituyen, por tanto, una etapa de validación y visualización previa a los análisis de eficiencia y pérdidas que se desarrollarán en el régimen turbulento.

CONCLUSIONES

Se estableció una metodología CFD sistemática para el análisis de bombas hidráulicas usando OpenFOAM, desde la preparación de la geometría y la generación de mallas de alta calidad, hasta la configuración de simulaciones con modelos de turbulencia y movimiento rotor-estátor (MRF/AMI).

Este enfoque permite evaluar de manera preliminar los fenómenos críticos que afectan la eficiencia hidráulica, como recirculaciones y pérdidas locales, y garantiza datos confiables para la posterior obtención de curvas de rendimiento y mapas de eficiencia.

La metodología desarrollada puede aplicarse en estudios futuros para optimizar bombas-turbina en sistemas reversibles de generación y almacenamiento de energía,

ofreciendo una base sólida para análisis más avanzados y validaciones experimentales.

REFERENCIAS

OpenFOAM: User Guide: Realizable $k-\epsilon$. (s. f.).

<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-realizable-k-epsilon.html>

OpenFOAM: User Guide: $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST). (s. f.).

<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html>