

OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UN RODETE PELTON MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS Y ANÁLISIS NUMÉRICO COMPUTACIONAL

Victor Hidalgo ¹, Guillermo Barragán ¹, Melany Chávez ¹, Segundo Barreno ², Modesto Pérez-Sánchez ³

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito 170517, Ecuador; victor.hidalgo@epn.edu.ec, guillermo.barragan@epn.edu.ec, melany.chavez@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; sbarreno@uce.edu.ec.

3. Hydraulic Engineering and Environmental Department, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain; mopesan1@upv.es

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se enfoca en el desarrollo de una metodología para el diseño y la optimización de rodetes tipo Pelton, aplicando técnicas metaheurísticas de optimización en conjunto con simulación numérica computacional. Para ello, se realizó como caso de estudio el análisis de una turbina Pelton en operación perteneciente a ELEPCO SA. Se desarrolló un algoritmo para el dimensionamiento y la caracterización de los cangilones Pelton, el cual posteriormente se implementó dentro del algoritmo de optimización multiobjetivo NSGA-II. Los parámetros por optimizar considerados son β_1 , β_2 , B y L. Se determinó que bajo las condiciones reales de operación de la turbina se logrará la eficiencia máxima si $\beta_1 = 4^\circ$, $\beta_2 = 170^\circ$, B = 24 [cm] y L = 24 [cm]. Con base en los resultados de la optimización, se realizó una simulación en OpenFOAM mediante la cual se constató un aumento del 2.5% en la eficiencia. Para determinar posibles deformaciones y la capacidad de carga del cangilón, se llevó a cabo una simulación FSI mediante el acoplamiento del software OpenFOAM con CalculiX.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología desarrollada combina el uso de técnicas metaheurísticas de optimización con herramientas de simulación numérica computacional, orientadas a mejorar la eficiencia hidráulica de un rodete Pelton bajo condiciones reales de operación.

En primera instancia, se seleccionó como caso de estudio una turbina Pelton en operación perteneciente a la empresa ELEPCO

S.A., cuya caracterización geométrica y parámetros de funcionamiento fueron empleados como referencia. Sobre esta base, se construyó un modelo paramétrico del cangilón Pelton, implementando un algoritmo de dimensionamiento capaz de generar distintas configuraciones geométricas en función de un conjunto reducido de parámetros de control. Este modelo CAD paramétrico fue diseñado con el propósito de integrarse de manera directa en el proceso de optimización.

El procedimiento de optimización se estructuró en torno al algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), utilizado en problemas multiobjetivo. Los parámetros de diseño seleccionados como variables de decisión fueron: el ángulo de entrada (β_1), el ángulo de salida (β_2), el ancho del cangilón (B) y la longitud del cangilón (L). El objetivo principal consistió en maximizar la eficiencia hidráulica de la turbina, garantizando al mismo tiempo condiciones de operación seguras desde el punto de vista estructural.

Para la evaluación numérica de desempeño, se recurrió a simulaciones tridimensionales de dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante el software OpenFOAM, donde se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas (RANS) bajo condiciones representativas de operación. Paralelamente, se integró un análisis de interacción fluido-estructura (FSI), acoplando OpenFOAM con el software CalculiX, a fin de determinar deformaciones,

esfuerzos y capacidad de carga de los cangilones bajo solicitaciones hidráulicas reales.

Finalmente, se procedió a la validación del modelo en dos niveles: (i) verificación numérica a través de la comparación con estudios previos reportados en la literatura y (ii) validación experimental mediante el contraste con los datos de operación registrados en la turbina de referencia. Esta doble validación permitió establecer la confiabilidad tanto del modelo paramétrico como de la metodología de optimización desarrollada. En la Figura 1 se observa el diagrama de flujo metodológico del presente estudio, en el que destacan 4 etapas:

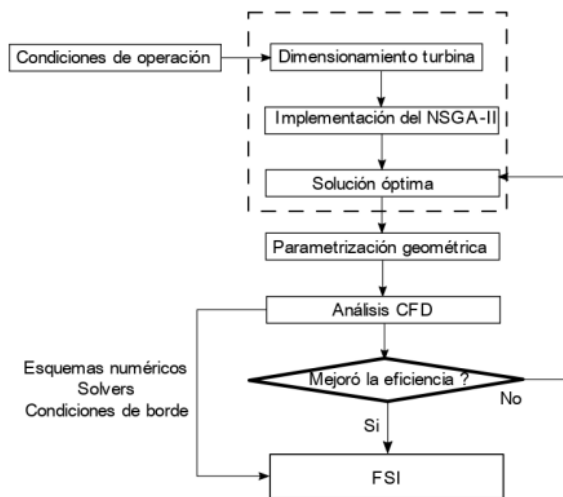


Figura 1.- Diagrama de flujo metodológico

optimización multiobjetivo, parametrización de la geometría, análisis CFD e Interacción fluido-estructura.

RESULTADOS

La implementación del algoritmo de optimización multiobjetivo NSGA-II permitió explorar de manera eficiente el espacio de diseño definido para el rodete Pelton. A partir de las simulaciones paramétricas realizadas, se identificaron combinaciones geométricas que ofrecieron mejoras significativas en el desempeño hidráulico de la turbina.

Los resultados indican que, bajo las condiciones reales de operación de la central de referencia, el diseño óptimo se alcanza con los

siguientes parámetros: ángulo de entrada $\beta_1 = 4^\circ$, $\beta_2 = 170^\circ$, $B = 24$ [cm] y $L = 24$ [cm]. Con esta configuración se logró un incremento en la eficiencia hidráulica del 2.5% al cangilón original que compone la turbina pelton perteneciente a la central “Illuchi N°2”. En la Figura 2 se muestran las curvas de momento obtenidas para un cangilón tanto para el modelo original como para el optimizado.

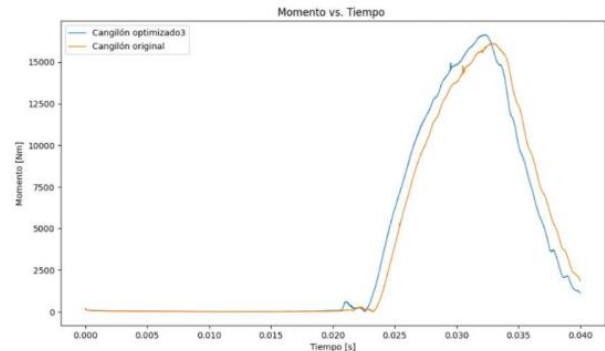


Figura 2.- Comparativa de las curvas de momento entre el modelo original y el optimizado.

El análisis CFD en OpenFOAM confirmó que la distribución de velocidad y presión en los cangilones optimizados favorece un aprovechamiento más uniforme del chorro, reduciendo pérdidas por impacto y zonas de recirculación. A nivel integral, esto se traduce en una mayor transferencia de energía entre el flujo y el rodete. En la Figura 3 se evidencian los contornos de presión y el comportamiento del flujo en distintos intervalos de tiempo.

Por otra parte, el análisis de interacción fluido-estructura (FSI) demostró que, bajo las condiciones hidráulicas de diseño, las deformaciones máximas en el material del cangilón permanecen dentro de los límites admisibles, sin comprometer la integridad

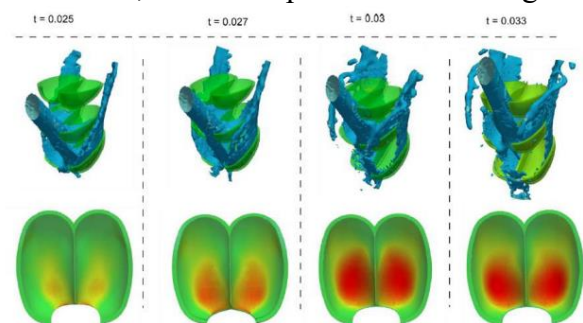


Figura 3.- Contorno de presiones en distintos instantes de tiempo.

estructural. Asimismo, la capacidad de carga calculada confirma que el diseño optimizado puede operar de manera segura en el rango de regímenes considerados. En la Figura 4 es posible identificar gran similitud en los contornos de presiones obtenidos mediante el análisis de la interacción fluido-estructura y el análisis rotatorio en CFD.

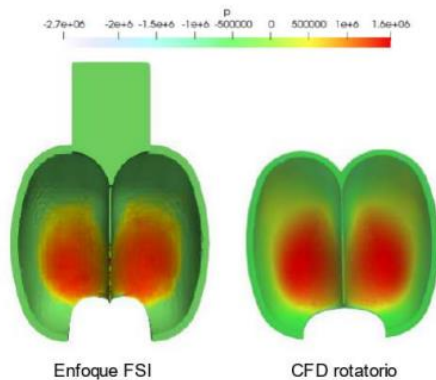


Figura 4.- Contorno de presiones obtenido en el FSI y el análisis CFD rotatorio.

En conjunto, estos resultados validan la pertinencia del enfoque metodológico propuesto, evidenciando que la integración de metaheurísticas de optimización y simulación computacional constituye una estrategia eficaz para el rediseño y mejora de turbomáquinas hidráulicas, con aplicación extensiva a otros casos más allá de la turbina Pelton analizada.

CONCLUSIONES

El presente estudio propuso una metodología integral para el diseño y optimización de turbinas tipo Pelton mediante la combinación de técnicas metaheurísticas y análisis numérico computacional. Los resultados obtenidos demuestran que este enfoque permite mejorar el desempeño hidráulico y estructural del rodete analizado.

La implementación del algoritmo NSGA-II condujo a configuraciones geométricas que incrementaron la eficiencia en un 2.5% respecto al diseño original, evidenciando un mayor aprovechamiento del recurso hídrico. Asimismo, las simulaciones CFD mostraron un adecuado nivel de precisión,

con un error máximo del 3.59% frente a datos experimentales y con una malla verificada por independencia numérica.

El análisis de interacción fluido-estructura (FSI) permitió identificar los patrones de deformación en los cangilones, confirmando que las solicitaciones permanecen dentro de los límites admisibles y garantizando la integridad estructural bajo condiciones de operación. Esto reafirma la utilidad del acoplamiento CFD-FSI como herramienta de apoyo en el diseño y optimización de turbomáquinas hidráulicas.

REFERENCIAS

- “Balance Nacional de Energía Eléctrica — Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables.”
<https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/>
(accessed Feb. 26, 2023).
- “Se actualiza la evaluación del Potencial Hidroenergético del país después de 40 años — Ministerio de Energía y Minas.”
<https://www.recursosyenergia.gob.ec/se-actualiza-la-evaluacion-del-potencial-hidroenergetico-del-pais-despues-de-40-anos/> (accessed Mar. 02, 2023).
- P. Fernández Díez, “DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA TURBINAS HIDRÁULICAS”, Accessed: Mar. 08, 2023.
[Online]. Available: <http://www.termica.webhop.info/>
- “What is Fluid-Structure Interaction and How Can You Simulate It? | Fluid Codes - Ansys Engineering Simulation Software.”
<https://fluidcodes.com/news/what-is-fluidstructure-interaction-and-how-can-you-simulate-it/> (accessed Mar. 30, 2023).
- G. Chicco and A. Mazza, “Metaheuristic optimization of power and energy systems: Underlying principles and main issues of the ‘rush to heuristics,’” *Energies* (Basel), vol. 13, no. 19, Oct. 2020, doi: 10.3390/EN13195097.