

OPTIMIZACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS MEDIANTE ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS Y CFD: RELEVANCIA Y AVANCES RECIENTES

Héctor Calvopiña, Jhon Luna y Luis Carrión

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, P.O. Box 6 171-5-231B, Ecuador
hacalvopina@espe.edu.ec, jaluna3@espe.edu.ec, lmcarrion1@espe.edu.ec

INTRODUCCIÓN

La optimización de turbinas hidráulicas constituye un campo de investigación fundamental en la búsqueda de eficiencia energética y sostenibilidad en el sector hidroeléctrico. Entre las distintas tipologías, las turbinas Pelton y Francis ocupan un papel destacado debido a su aplicación en escenarios de altos desniveles y variados caudales (Erazo et al., 2022). Sin embargo, la complejidad inherente al flujo multifásico y a la interacción entre el chorro de agua y los componentes del rodete dificulta la predicción precisa del rendimiento, lo que exige metodologías avanzadas de optimización (Barragán et al., 2025).

En este contexto, la combinación de dinámica de fluidos computacional (CFD) y algoritmos metaheurísticos se presenta como una estrategia robusta para explorar espacios de diseño complejos y multivariantes. El uso de modelos paramétricos acoplados con CFD ha permitido representar con fidelidad la geometría de los álabes y predecir su desempeño bajo diferentes condiciones operativas, validando los resultados con datos de campo (Erazo et al., 2022). Por su parte, algoritmos evolutivos como NSGA-II (non-dominated sorting-based multi – objective evolutionary algorithm) y enfoques híbridos que integran redes neuronales han mostrado mejoras significativas en la eficiencia hidráulica de hasta un 4% así como una reducción en las pérdidas energéticas (Chen et al., 2022; Li et al., 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de optimización de turbinas hidráulicas puede organizarse en cuatro ejes metodológicos principales:

Modelos paramétricos: se construyen representaciones geométricas de los cangilones (longitud, ancho, ángulos de entrada y salida) mediante herramientas CAD, integradas con simulaciones CFD para evaluar el desempeño hidráulico bajo condiciones operativas reales.

Algoritmos metaheurísticos: se aplican técnicas evolutivas, como por ejemplo el NSGA-II, para explorar espacios de diseño multivariable, analizando compromisos entre eficiencia hidráulica, distribución de presiones y cargas estructurales.

Métodos de diseño experimental (DOE): se utiliza la estrategia OT-CFD (ensayo ortogonal combinado con CFD) para priorizar variables de diseño, identificando parámetros críticos como el ángulo de entrada.

Inteligencia artificial híbrida: se implementa una aproximación que combina algoritmos de búsqueda inteligente (ISMA) con redes neuronales de retro propagación (BPNN), la cual predice el rendimiento hidráulico a partir de datos simulados y reduce el costo computacional de iteraciones repetidas de CFD.

La Figura 1 propone un flujo de trabajo metodológico para la optimización de turbinas hidráulicas. El proceso inicia con la construcción de un modelo paramétrico, seguido de la simulación CFD. Posteriormente, se aplican algoritmos de optimización y, finalmente, se valida experimentalmente.

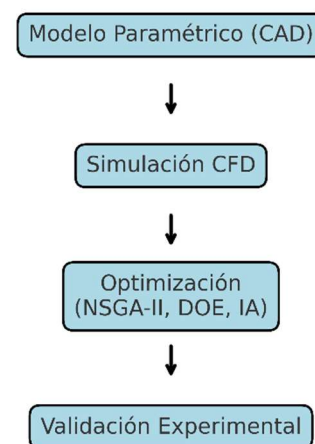


Figura 1.- Flujo de trabajo metodológico para la optimización de turbinas hidráulicas.

RESULTADOS

Los estudios revisados evidencian mejoras significativas en la eficiencia hidráulica y la reducción de pérdidas energéticas mediante la aplicación de modelos paramétricos, algoritmos metaheurísticos y enfoques híbridos.

En la central Illuchi N°2 (Ecuador), la implementación de un modelo paramétrico validado mediante CFD reportó una mejora del 4% en la eficiencia global, confirmada con datos experimentales (Erazo et al., 2022).

La aplicación de algoritmos metaheurísticos evolutivos del tipo NSGA-II en la optimización de los parámetros geométricos de los cangilones (ancho, largo y ángulos) en una turbina Pelton produjo un incremento del 2,56% en la eficiencia hidráulica y una reducción de cargas de presión localizadas en la base del cangilón (Barragán et al., 2025).

El diseño experimental en turbinas Francis (DOE-OT-CFD) permitió la identificación del ángulo de entrada como parámetro crítico, alcanzando mejoras de hasta 10,9% en la eficiencia hidráulica, resaltando la relevancia de este factor en el diseño (Chen et al., 2022).

La integración de modelos predictivos basados en redes neuronales con algoritmos de búsqueda inteligente mostró un desempeño robusto en predicción del rendimiento y una reducción significativa de los costos computacionales (Li et al., 2023).

En conjunto, estos resultados demuestran que los enfoques de optimización geométrica y metaheurística son aplicables tanto en turbinas Pelton como en otras tipologías hidráulicas.

CONCLUSIONES

La optimización geométrica de turbinas hidráulicas se confirma como un factor determinante para incrementar la eficiencia de conversión energética y reducir las pérdidas inherentes al proceso de generación hidroeléctrica. En particular, los algoritmos metaheurísticos multiobjetivo, como el NSGA-II, han mostrado mejoras tangibles en casos reales de aplicación, como lo evidencia la experiencia en la central hidroeléctrica Illuchi N°2 (Ecuador), donde se alcanzaron incrementos de eficiencia y una notable reducción de esfuerzos hidráulicos localizados.

Por otra parte, los modelos paramétricos apoyados en CFD se consolidan como herramientas versátiles y accesibles para el rediseño de turbinas, ya que permiten explorar configuraciones geométricas alternativas con rapidez y precisión, reduciendo la dependencia de prototipos físicos. En este mismo sentido, las estrategias híbridas, que integran inteligencia artificial, diseño de experimentos y algoritmos metaheurísticos evolutivos, representan una tendencia emergente de gran proyección, al disminuir los tiempos de cálculo y los costos de diseño, sin comprometer la robustez de los resultados.

Los avances descritos evidencian que la combinación de CFD, IA y algoritmos metaheurísticos no solo impulsa la competitividad de las plantas hidroeléctricas, sino que también fortalece la transición hacia un modelo energético sostenible, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, garantizando energía renovable, asequible y ambientalmente responsable.

REFERENCIAS

- Chen, J., Zheng, Y., Zhang, L., He, G., Zou, Y., & Xiao, Z. (2022). Optimization of geometric parameters of hydraulic turbine runner in turbine mode based on the orthogonal test method and CFD. *Energy Reports*, 8, 14476–14487.
- Barragán, G., Atarihuana, S., Cando, E., & Hidalgo, V. (2025). Enhancing Hydraulic Efficiency of Pelton Turbines Through CFD and Metaheuristic Optimization. *Algorithms*, 18, 35.
- Erazo, J., Barragán, G., Pérez-Sánchez, M., Tapia, C., Calahorrano, M., & Hidalgo, V. (2022). Geometrical Optimization of Pelton Turbine Buckets by Parametric Model—Illuchi N2 (Ecuador). *Energies*, 15, 9052.
- Li, et al. (2023). Optimization of geometric parameters of hydraulic turbine runner in turbine mode based on ISMA and BPNN. *Energy Science & Engineering*.