ASCE MAGAZINE ISSN: 3073-1178

Revista ASCE Magazine, Periodicidad: Trimestral, Volumen: 5, Número: 4, Año: 2026 páginas 419-438

Doi: https://doi.org/10.70577/asce.v5i4.1136

Recibido: 2026-10-07

Aceptado: 2026-10-21

Publicado: 2026-11-04

Avances en la optimización hidráulica y mecánica de turbinas hidrocinéticas para la generación de energía renovable: una revisión sistemática de la literatura bajo la metodología PRISMA 2020

Advances in the hydraulic and mechanical optimization of hydrokinetic turbines for renewable energy generation: a systematic literature review following the PRISMA 2020 methodology

Autor(s)

Juan Francisco Durango Grisales[1]
juan.durango@alumnos.upm.es
https://orcid.org/0000-0002-4341-2377
Universidad Politécnica de Madrid
Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería - HANDASA S.A.S.
Madrid - España

Ramón Gabriel Aguilar Vega[2]
raguilar@poligran.edu.com
https://orcid.org/0000-0003-3934-7047
Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano
Bogotá - Colombia

Juan Carlos Cerón Vinueza[3]
jccv1985@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0001-6250-0604
Investigador Independiente
Quito - Ecuador

Vily Dick Mamani Osco[4]
vilydickmamaniosco@gmail.com
https://orcid.org/0009-0002-7064-2677
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
La Paz - Bolivia

Franklin César Ramírez Baquerizo[5]
framirez2602@upse.edu.ec
https://orcid.org/0009-0004-8228-9465
Universidad Estatal Península de Santa Elena - UPSE
La Libertad - Ecuador

Cómo citar

Durango Grisales, J. F., Aguilar Vega, R. G., Cerón Vinueza, J. C., Mamani Osco, V. D., & Ramírez Baquerizo, F. C. (2026). Avances en la optimización hidráulica y mecánica de turbinas hidrocinéticas para la generación de energía renovable: una revisión sistemática de la literatura bajo la metodología PRISMA 2020. *ASCE MAGAZINE*, *5*(4), 419–438. https://doi.org/10.70577/asce.v5i4.1136

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Resumen

Las turbinas hidrocinéticas, han surgido como una opción atractiva, para aprovechar la energía cinética presente en ríos, estuarios, y corrientes mareomotrices, sin requerir grandes infraestructuras hidráulicas, sin embargo, el rendimiento de estos sistemas, depende de una interacción compleja, entre variables hidráulicas y mecánicas. A pesar del aumento de investigaciones en el área, el conocimiento disponible, permanece disperso entre disciplinas, lo que dificulta una comprensión integrada del estado actual de la tecnología, y de las estrategias más efectivas, para incrementar su eficiencia. Objetivo. Analizar los avances científicos recientes, relacionados con la optimización hidráulica, y mecánica de turbinas hidrocinéticas, destinadas a la generación de energía renovable. Metodología. Se desarrolló una revisión sistemática, bajo los lineamientos PRISMA 2020, la búsqueda se realizó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, MDPI, y Wiley Online Library, se incluyeron artículos científicos publicados entre 2021 y 2026. Resultados. La evidencia mostró, una tendencia hacia enfoques multidisciplinarios, que integran diseño mecánico, optimización hidráulica, y simulación CFD; los principales avances incluyeron, la optimización geométrica de rotores y álabes, el uso de ductos, para mejorar la captación energética, la aplicación extensiva de CFD, para el diseño y validación de turbinas. Conclusiones. La combinación de estrategias, hidráulicas y mecánicas, proporciona los mayores incrementos de rendimiento en turbinas hidrocinéticas; CFD se consolidó, como la herramienta dominante de análisis, mientras que la inteligencia artificial, emerge como un recurso prometedor para el diseño predictivo, y la optimización avanzada; no obstante, persiste una limitada validación, en condiciones reales de operación.

Palabras claves: Dinámica de fluidos, Gestión de los recursos hídricos, Ingeniería mecánica, Inteligencia artificial, Recursos renovables

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Abstract

Hydrokinetic turbines have emerged as an attractive option for harnessing the kinetic energy present in rivers, estuaries, and tidal currents, without the need for large-scale hydraulic infrastructure. However, the performance of these systems depends on a complex interaction between hydraulic and mechanical variables. Despite an increase in research in this field, existing knowledge remains fragmented across various disciplines, which hinders an integrated understanding of the current state of the technology and the most effective strategies for enhancing its efficiency. Objective. To analyze recent scientific advancements related to the hydraulic and mechanical optimization of hydrokinetic turbines designed for renewable energy generation. Methodology. A systematic review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines. The search was performed across Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, MDPI, and Wiley Online Library, including scientific articles published between 2021 and 2026. Results. The evidence showed a trend toward multidisciplinary approaches that integrate mechanical design, hydraulic optimization, and CFD simulation. Key advancements included the geometric optimization of rotors and blades, the use of ducts to improve energy capture, and the extensive application of CFD for the design and validation of turbines. Conclusions. Combining hydraulic and mechanical strategies yields the greatest performance gains in hydrokinetic turbines. CFD has established itself as the dominant analysis tool, while artificial intelligence is emerging as a promising resource for predictive design and advanced optimization; however, there remains a lack of validation under actual operating conditions.

Keywords: Fluid dynamics, Water resource management, Mechanical engineering, Artificial intelligence, Renewable resources

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

La necesidad de transformar los sistemas energéticos actuales, ha situado a las fuentes renovables en el centro de las estrategias de descarbonización, implementadas a escala global (Nekahi et al., 2025). Aunque la energía solar y eólica, han concentrado gran parte de la atención científica, y tecnológica, los recursos hidrocinéticos, han comenzado a consolidarse como una alternativa complementaria, capaz de aprovechar la energía cinética presente en corrientes fluviales, estuarios y zonas mareomotrices, sin requerir grandes infraestructuras hidráulicas (Boretti & Castelletto, 2025). Esta característica resulta especialmente atractiva para regiones aisladas, o con limitaciones de acceso a redes eléctricas convencionales, donde la generación distribuida representa una solución técnica, y socialmente relevante (Betancur Gómez et al., 2023).

Las turbinas hidrocinéticas, constituyen el componente principal de estos sistemas de conversión energética. Su funcionamiento, depende de una interacción compleja entre fenómenos hidrodinámicos, y variables mecánicas, que afectan de manera directa la capacidad de extracción energética (Ileberi & Li, 2023).

En consecuencia, la eficiencia global de una turbina, no puede explicarse únicamente, desde la hidráulica ni exclusivamente desde la ingeniería mecánica (Lakatos et al., 2026). El comportamiento del flujo, la presencia de turbulencias, los efectos de cavitación, la configuración de los perfiles hidrodinámicos, y las características geométricas del rotor conforman un sistema altamente interdependiente, cuya optimización exige una aproximación multidisciplinaria (Park et al., 2023).

Durante los últimos cinco años, se ha observado una evolución significativa en los enfoques de diseño, aplicados a estas tecnologías. La literatura reciente refleja, una transición desde metodologías basadas en pruebas experimentales, aisladas hacia modelos integrados que combinan dinámica computacional de fluidos (CFD), optimización paramétrica, algoritmos numéricos avanzados, y herramientas de inteligencia artificial (Alhousni et al., 2025). Esta tendencia ha favorecido el desarrollo de configuraciones, capaces de incrementar la eficiencia energética, reducir pérdidas por separación de flujo, y mejorar la confiabilidad estructural, de los dispositivos sometidos a condiciones hidráulicas variables (Z. Liu et al., 2025; Park et al., 2023).

Desde una perspectiva hidráulica, la investigación reciente ha concentrado esfuerzos en comprender los mecanismos, que gobiernan la aceleración del flujo, la distribución de velocidades

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

alrededor de los rotores, y el comportamiento de las estelas hidráulicas (Zemanová & Rudolf, 2020). Los avances obtenidos mediante simulaciones de alta fidelidad, han permitido identificar configuraciones capaces de maximizar el coeficiente de potencia, y minimizar fenómenos que limitan el desempeño energético (Yang et al., 2026). En particular, el desarrollo de turbinas canalizadas o ductadas, ha demostrado mejoras sustanciales en la captura de energía, al modificar favorablemente el comportamiento del flujo incidente sobre las palas del rotor (Song et al., 2026). Paralelamente, la ingeniería mecánica, ha contribuido con innovaciones relacionadas con la geometría de los álabes, la optimización estructural, la selección de materiales, y la evaluación de esfuerzos dinámicos (Zhong et al., 2025). El interés por incrementar la vida útil de los componentes, y disminuir los costos de mantenimiento, ha impulsado investigaciones enfocadas en materiales compuestos, manufactura avanzada, y análisis de cargas operativas (Fekiač et al., 2025). Estas contribuciones, han permitido diseñar turbinas más robustas, frente a condiciones de operación complejas, especialmente en ambientes marinos, y fluviales caracterizados, por fluctuaciones permanentes del régimen hidráulico (Gu et al., 2024).

Otro aspecto que merece particular atención, corresponde a la incorporación progresiva, de técnicas de optimización multidisciplinaria. La evidencia científica reciente, muestra que el diseño tradicional, basado en procesos secuenciales, ha comenzado a ser sustituido por estrategias que integran simultáneamente variables hidráulicas, mecánicas, y de control (Gong et al., 2020). Bajo este enfoque, el desempeño energético, se analiza como resultado de la interacción entre geometría, dinámica estructural, y sistemas de regulación operativa, lo que permite identificar soluciones más eficientes que aquellas obtenidas mediante optimizaciones independientes (Jiang et al., 2022).

A pesar del notable crecimiento, de la producción científica en esta área, el conocimiento disponible permanece fragmentado entre disciplinas, que suelen desarrollar sus avances de manera separada. Una parte importante de los estudios enfatiza aspectos hidrodinámicos, relacionados con CFD, y caracterización del flujo, mientras que otros, se concentran en variables estructurales, materiales, o estrategias de control. Esta dispersión dificulta la construcción, de una visión integral que permita comprender, cómo los avances hidráulicos, y mecánicos convergen, para mejorar el rendimiento de las turbinas hidrocinéticas.

Bajo este contexto, resulta pertinente desarrollar una revisión sistemática de la literatura, que sintetice la evidencia científica, publicada entre 2021 y 2026, aplicando la metodología PRISMA

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

2020. Para identificar las principales tendencias tecnológicas, esta revisión, permitirá reconocer vacíos de investigación, contrastar enfoques de optimización, y establecer perspectivas futuras, para el desarrollo de sistemas hidrocinéticos más eficientes, y competitivos dentro del sector de las energías renovables.

Material y Métodos

La investigación se desarrolló, mediante una revisión sistemática de la literatura, siguiendo las directrices de la declaración PRISMA 2020, con el propósito de identificar, y sintetizar, la evidencia científica disponible sobre los avances en la optimización hidráulica, y mecánica de turbinas hidrocinéticas, para la generación de energía renovable. Este enfoque permitió estructurar un proceso de búsqueda, selección, y análisis transparente, reproducible y sustentado, en criterios de calidad metodológica.

La búsqueda bibliográfica, se efectuó en las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, MDPI, y Wiley Online Library. Se consideraron únicamente artículos científicos, publicados entre 2021 y 2026, revisados por pares, e indexados en bases de datos reconocidas. Las estrategias de búsqueda, combinaron términos relacionados con; turbinas hidrocinéticas, optimización mecánica, optimización hidráulica, dinámica de fluidos computacional (CFD), y generación de energía renovable. La construcción de las ecuaciones de búsqueda, se fundamentó en terminología empleada de forma recurrente en investigaciones recientes sobre diseño, y optimización de sistemas hidrocinéticos.

Los criterios de inclusión, contemplaron artículos originales publicados, dentro del período de estudio, escritos en inglés, con DOI disponible, y acceso a texto completo. Además, los trabajos debían abordar de forma directa, aspectos relacionados con diseño mecánico, optimización hidráulica, simulación CFD, materiales avanzados o estrategias de mejora, del rendimiento energético de turbinas hidrocinéticas. Por otra parte, se excluyeron todos los trabajos contrarios a lo anteriormente solicitado.

El proceso de selección, se efectuó en cuatro etapas: 1) se identificaron los registros recuperados en las bases de datos seleccionadas, 2) se eliminaron los documentos duplicados, 3) se revisaron títulos y resúmenes, y 4) los artículos potencialmente elegibles, fueron sometidos a una lectura completa, tras la cual se definió la muestra final de estudios, incluidos en la síntesis cualitativa.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Con el fin de garantizar, la confiabilidad de la evidencia recopilada, se aplicó la herramienta Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT 2018), la evaluación consideró la claridad metodológica, la consistencia de los procedimientos experimentales, la validez de los resultados, la reproducibilidad de los estudios, y la relevancia técnica de los hallazgos.

Resultados

Características generales. de los estudios seleccionados

El proceso de búsqueda y selección, permitió identificar una producción científica creciente, sobre turbinas hidrocinéticas, durante el período 2021-2026. Los estudios incluidos, evidenciaron una marcada concentración, en países con programas activos de investigación en energías renovables, particularmente Estados Unidos, China, Canadá, Reino Unido, Colombia, e India. Asimismo, se observó, que las publicaciones se distribuyeron principalmente, en revistas de ingeniería energética, dinámica de fluidos, sistemas renovables, y diseño de turbomáquinas.

La literatura analizada, mostró una convergencia progresiva entre disciplinas, que tradicionalmente evolucionaban de forma independiente (Tabla 1). Las investigaciones más recientes, no se limitaron al análisis hidráulico del flujo, ni al estudio estructural de los rotores, sino que integraron modelos multidisciplinarios, donde la geometría de las turbinas, la respuesta mecánica de los materiales, y el comportamiento hidrodinámico, fueron evaluados de manera simultánea.

Tabla 1.

Caracterización general, de estudios representativos

Autor	Tipo de turbina	Enfoque principal	Hallazgo relevante
(Park et al., 2023)	Eje horizontal canalizada	Optimización CFD	Incremento de eficiencia hasta 54% mediante ductos optimizados.
(Betancur Gómez et al., 2023)	Eje horizontal	Validación experimental y CFD	Coeficiente de potencia numérico de 0.434
(Jiang et al., 2022)	Hidrocinética de eje horizontal	Co-diseño rotor-control	Incremento de producción energética mediante optimización integrada.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

(Velásquez et al., 2025)	Gorlov de eje vertical	Optimización geométrica	Coeficiente de potencia de 40.8%.

Avances en el diseño mecánico, de turbinas hidrocinéticas

Los resultados obtenidos, muestran que la optimización mecánica (Figura 1), se ha orientado hacia configuraciones geométricas capaces de incrementar la extracción energética, sin comprometer la estabilidad estructural. La evidencia indica que, las modificaciones aplicadas a perfiles hidrodinámicos, relaciones de aspecto, número de álabes, y diseños helicoidales, permitieron mejoras significativas en el desempeño global de las turbinas.

Las turbinas de eje vertical tipo Gorlov, recibieron especial atención, debido a su funcionamiento estable bajo flujos variables. El análisis efectuado por Velásquez et al. (2025), demostró que la combinación óptima, entre relación de aspecto, solidez y configuración helicoidal, favorece simultáneamente la eficiencia energética, y la robustez mecánica, aspecto particularmente importante en aplicaciones rurales, y sistemas aislados.

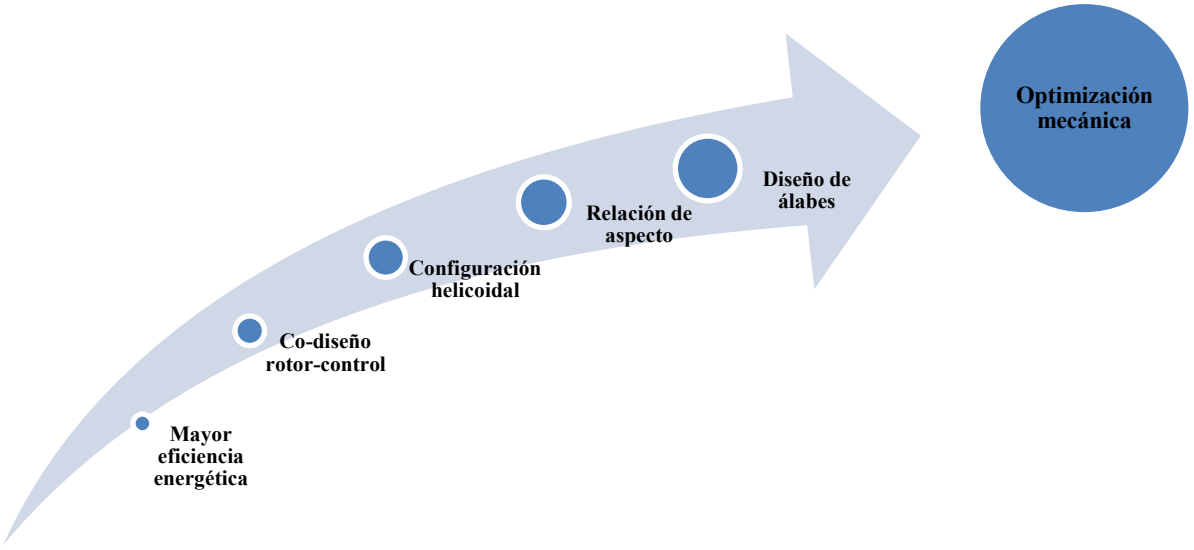
En paralelo, las investigaciones desarrolladas sobre rotores de eje horizontal, evidenciaron beneficios, asociados a la optimización paramétrica de perfiles hidrodinámicos. El empleo del perfil EPPLER E817, permitió alcanzar valores superiores de coeficiente de potencia, respecto a configuraciones convencionales, lo que confirma la influencia crítica del diseño geométrico, en la captura energética (Betancur Gómez et al., 2023).

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Figura 1.

Tendencias recientes en diseño mecánico



Estrategias de optimización hidráulica, para maximizar la eficiencia energética

La optimización hidráulica, representó una de las líneas de investigación, más dinámicas identificadas durante la revisión. La mayoría de los estudios coincidió en que, el control de la distribución de velocidades, alrededor del rotor constituye un factor determinante, para mejorar la conversión energética (Tabla 2).

Uno de los avances más relevantes, corresponde al uso de sistemas canalizados o ductados. La investigación desarrollada por, Park et al. (2023) comprobó, que la incorporación de ductos especialmente diseñados, modifica las características del flujo, incrementa la velocidad efectiva incidente sobre las palas, y mejora la capacidad de extracción energética. El modelo optimizado, alcanzó aproximadamente un 54% de eficiencia, cifra superior a la reportada, para turbinas convencionales sin canalización.

De igual manera, numerosas investigaciones destacaron la reducción de pérdidas, asociadas a turbulencia, separación de flujo, y estelas hidráulicas, como mecanismos esenciales para aumentar el coeficiente de potencia. Estas estrategias permitieron mejorar el rendimiento, incluso en corrientes de baja velocidad, situación frecuente en aplicaciones hidrocinéticas continentales.

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Tabla 2.

Estrategias hidráulicas identificadas

Estrategia	Beneficio observado	Impacto energético
Ductos aceleradores	Incremento de velocidad local	Alto
Optimización del TSR	Mejor aprovechamiento del flujo	Alto
Reducción de turbulencia	Menor pérdida energética	Medio-Alto
Control de cavitación	Mayor durabilidad y eficiencia	Medio
Optimización hidrodinámica del álabe	Incremento del coeficiente de potencia	Alto

Uso de herramientas CFD, en la evaluación del desempeño hidrocinético

La dinámica computacional de fluidos (CFD), se consolidó como la herramienta predominante, para el diseño, y evaluación de turbinas hidrocinéticas. Todos los estudios de mayor impacto identificados, incorporaron simulaciones numéricas, como etapa previa a la validación experimental (Figura 2).

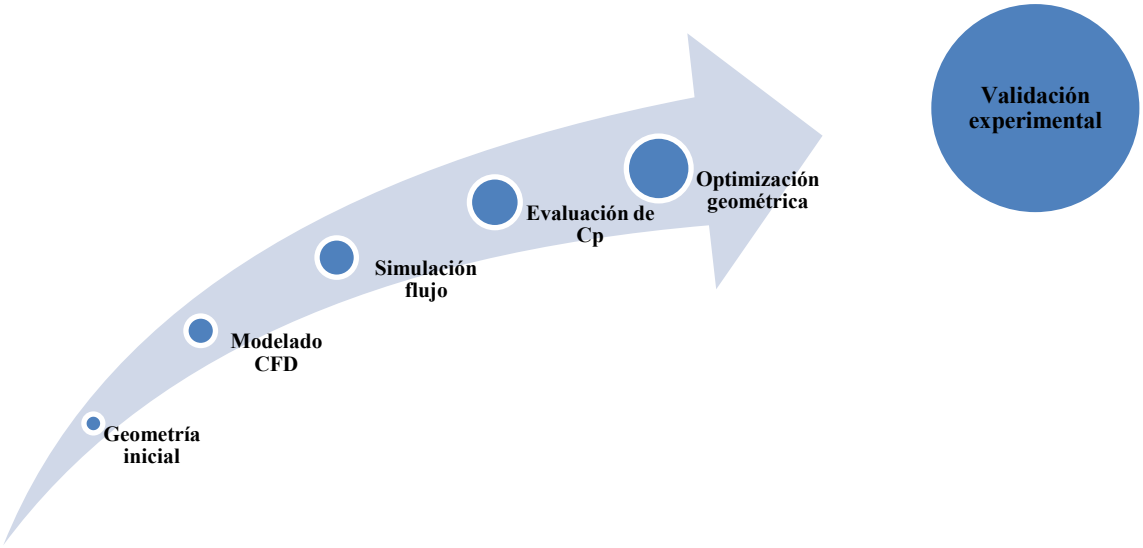
Los modelos RANS y URANS, fueron los enfoques más empleados, debido a su equilibrio entre precisión, y costo computacional. El trabajo de Park et al. (2023), utilizó simulaciones CFD acopladas con algoritmos de optimización, mediante gradientes adjuntos para explorar miles de configuraciones geométricas, antes de seleccionar el diseño final. Este procedimiento redujo tiempos de desarrollo, y permitió maximizar la eficiencia energética del sistema.

Por otra parte, Betancur Gómez et al. (2023), compararon resultados experimentales, y simulados, encontrando una correspondencia adecuada, en la identificación del régimen operativo óptimo. Esta concordancia fortaleció la confiabilidad de las simulaciones CFD, como herramienta de predicción del comportamiento hidrocinético.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Figura 2.

Aplicación de CFD, en el desarrollo de turbinas



Materiales innovadores, y técnicas avanzadas de fabricación

La selección de materiales surgió, como un elemento estratégico, para aumentar la vida útil de las turbinas, y limitar los costos de operación (Tabla 3). La literatura reciente reportó, un creciente interés por materiales compuestos reforzados con fibras, debido a su elevada resistencia específica, y baja densidad.

Asimismo, varios estudios incorporaron procesos de manufactura aditiva, para la construcción rápida de prototipos. Esta técnica favoreció la validación experimental de diseños optimizados mediante CFD, y redujo significativamente los tiempos asociados al desarrollo de nuevos rotores (Betancur Gómez et al., 2023).

La evidencia también mostró una tendencia creciente, hacia el uso de materiales híbridos, particularmente en componentes sometidos a cargas cíclicas, y ambientes corrosivos. Estas soluciones buscan equilibrar resistencia estructural, peso, y durabilidad a largo plazo.

Tabla 3.

Principales materiales identificados

Material	Aplicación	Ventaja principal
Fibra de carbono	Álabes y rotores	Alta relación resistencia-peso
Fibra de vidrio	Estructuras secundarias	Bajo costo

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Compuestos híbridos	Rotores avanzados	Resistencia a fatiga
Polímeros reforzados	Prototipado	Facilidad de fabricación
Manufactura aditiva	Desarrollo experimental	Rapidez y flexibilidad

Tendencias emergentes, desafíos técnicos, y perspectivas futuras

La revisión permitió identificar, una evolución clara hacia sistemas inteligentes de diseño, y operación. Los estudios más recientes, comenzaron a incorporar algoritmos de optimización multidisciplinaria, aprendizaje automático, e integración entre control dinámico, y diseño mecánico. En este contexto, el trabajo de (Jiang et al., 2022), evidenció que el co-diseño, entre rotor, y estrategia de control, genera mejores resultados que los procedimientos tradicionales ejecutados por etapas independientes.

Otra tendencia destacable, corresponde a la combinación entre CFD avanzada, e inteligencia artificial. La optimización automatizada de geometrías, permite explorar espacios de diseño imposibles de evaluar, mediante aproximaciones convencionales, lo que acelera el desarrollo tecnológico y mejora la eficiencia energética, de los dispositivos.

A pesar de estos avances, persisten limitaciones importantes. La mayoría de los estudios continúan enfocados, en condiciones controladas de laboratorio o simulaciones idealizadas. Existe una escasez de investigaciones, que analicen el comportamiento de estos sistemas durante largos períodos de operación en ambientes reales, donde intervienen fenómenos complejos, como bioincrustación, sedimentación, corrosión, y variabilidad hidrológica.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que, la investigación reciente sobre turbinas hidrocinéticas, ha evolucionado hacia enfoques de optimización multidisciplinaria, donde convergen la ingeniería mecánica, la hidráulica computacional, la inteligencia artificial, y los sistemas avanzados de control, esta evolución responde a la necesidad de superar, las limitaciones observadas en los diseños convencionales, cuyos incrementos de rendimiento, comenzaron a mostrar rendimientos decrecientes, cuando las modificaciones se aplicaban únicamente sobre variables geométricas, o hidrodinámicas de forma aislada.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

En este contexto, los estudios revisados, coinciden en reconocer que la eficiencia energética, depende de la interacción entre el flujo hidráulico, y la respuesta mecánica de la turbina, sin embargo, existen diferencias importantes, respecto al factor que cada autor considera más determinante, para alcanzar mejoras significativas en el desempeño energético.

Park, J. et al. (2023) sostienen que, la optimización hidráulica constituye la principal vía, para aumentar la producción energética. Sus resultados demostraron que la incorporación de ductos optimizados mediante CFD, incrementa la velocidad efectiva del flujo, y mejora sustancialmente la extracción energética, alcanzando eficiencias cercanas al 54%. Desde esta perspectiva, el acondicionamiento hidráulico del flujo, adquiere mayor relevancia que las modificaciones geométricas convencionales del rotor (Ai et al., 2021).

Por el contrario, Velásquez, L. et al. (2025) concluyen que, la optimización geométrica de la turbina, continúa siendo el factor predominante, para mejorar el rendimiento global. Su investigación sobre turbinas Gorlov de eje vertical, demostró que parámetros como la solidez, el índice de revolución, y la relación de aspecto influyen simultáneamente, sobre la eficiencia energética, y la estabilidad estructural, en consecuencia, estos autores consideran que, el potencial energético disponible en el flujo, solamente puede aprovecharse cuando el diseño mecánico presenta una configuración adecuada.

Los hallazgos de Betancur Gómez, J. D. et al. (2023), permiten establecer un punto de encuentro, entre ambas posturas. Sus resultados experimentales, y numéricos indican que, el desempeño energético no depende exclusivamente, de la hidráulica ni de la mecánica, sino de la interacción entre el perfil hidrodinámico, las propiedades geométricas del rotor, y las condiciones particulares del flujo donde opera la turbina, esta evidencia sugiere que, los modelos centrados exclusivamente en una de estas dimensiones, presentan limitaciones para explicar el comportamiento integral de los sistemas hidrocinéticos.

A su vez, al realizar una comparación crítica entre autores (Tabla 4); se conoció que; Liu et al. (2025), demostraron que los modelos de aprendizaje automático, permiten optimizar ductos hidráulicos con niveles de precisión, y velocidad, superiores a los procedimientos tradicionales, logrando incrementos superiores al 11%, en el coeficiente de potencia, y una reducción significativa, de las cargas hidráulicas ejercidas sobre el sistema. Sus hallazgos respaldan la idea

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

de que, la inteligencia artificial está dejando de ser una herramienta complementaria, para convertirse en un elemento central, dentro de los procesos de diseño hidrocinético.

Resultados similares, fueron reportados por Liu et al. (2025), quienes emplearon técnicas de aprendizaje avanzado, para optimizar la configuración estructural de turbinas Savonius. A diferencia de los trabajos centrados en la hidráulica, estos autores, utilizaron inteligencia artificial, para resolver problemas de diseño mecánico, obteniendo mejoras, tanto en eficiencia, como en estabilidad operativa, esta convergencia evidencia que las técnicas de aprendizaje automático poseen aplicaciones transversales en prácticamente todas las áreas de la ingeniería hidrocinética.

Otro aspecto relevante, corresponde al papel desempeñado por la dinámica computacional de fluidos. Pues, todos los estudios analizados, recurren a CFD, como herramienta principal de evaluación, sin embargo, existen diferencias, respecto al nivel de dependencia otorgado a estos modelos numéricos. Mientras Park, J. et al. (2023), continúan considerando las simulaciones CFD de alta fidelidad, como el núcleo del proceso de optimización, Bowman et al. (2024), argumentan que los elevados costos computacionales, asociados a estos procedimientos limitan su aplicación práctica, en escenarios complejos. Para superar esta restricción, propusieron modelos híbridos, que combinan CFD, con algoritmos de aprendizaje automático, capaces de reproducir la dinámica de estelas hidrocinéticas, con una precisión elevada, y una demanda computacional considerablemente menor.

Desde una perspectiva metodológica, esta discrepancia revela una discusión emergente, dentro de la literatura científica. Los modelos CFD tradicionales, proporcionan una representación física más detallada del fenómeno, pero requieren recursos computacionales significativos, en contraste, los modelos basados en inteligencia artificial, aceleran los procesos de diseño, aunque dependen de conjuntos de datos previos, y presentan limitaciones, para extrapolar resultados fuera de las condiciones utilizadas durante el entrenamiento.

Asimismo, la revisión permitió identificar diferencias importantes, respecto a la visión futura del sector hidrocinético. Jiang et al. (2022), consideran que los mayores avances estarán asociados a sistemas de codiseño, donde el rotor y los algoritmos de control, se optimicen simultáneamente. Según estos autores, gran parte de las pérdidas energéticas observadas actualmente, se origina en una integración insuficiente, entre la arquitectura física de la turbina, y sus sistemas de supervisión operativa.

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Por otra parte, Salinas-León y Ochoa-Correa (2025), plantean una visión más amplia. Sus resultados muestran que, la eficiencia tecnológica, pierde relevancia cuando la turbina es instalada en emplazamientos, con escaso potencial hidrocinético, o con restricciones ambientales significativas, desde esta perspectiva, la selección del sitio, constituye una variable tan importante, como el diseño mecánico, o hidráulico del dispositivo.

Finalmente, Restrepo-Zapata et al. (2025) introducen un enfoque que, contrasta con gran parte de la literatura técnica. Mientras la mayoría de los estudios, concentran su atención en maximizar el rendimiento energético, estos autores destacan la necesidad de evaluar impactos ecológicos, interacción con fauna acuática, y sostenibilidad ambiental. Esta posición resulta especialmente relevante, debido a que el éxito futuro de las turbinas hidrocinéticas, dependerá no solo de su eficiencia técnica, sino también de su capacidad, para coexistir con los ecosistemas fluviales, y marinos donde serán implementadas.

Tabla 4.

Comparación crítica entre autores

Autor	Enfoque principal	Principales hallazgos	Coincidencias	Diferencias críticas
(Park et al., 2023)	Optimización hidráulica, mediante CFD	Eficiencia cercana al 54 % mediante ductos optimizados	Reconoce la importancia de CFD, y la integración multidisciplinaria	Prioriza la hidráulica sobre el diseño mecánico
(Betancur Gómez et al., 2023)	Validación experimental, y CFD	Correlación entre simulación, y desempeño real	Considera necesaria la integración hidráulica-mecánica	Presenta una visión intermedia entre diseño, y flujo
(Velásquez et al., 2025)	Optimización mecánica	Mejora del coeficiente de potencia, mediante geometría Gorlov	Reconoce la influencia hidráulica	Otorga prioridad a la configuración estructural
(Jiang et al., 2022)	Codiseño rotor-control	Incremento de producción energética	Defiende la optimización integrada	Considera insuficiente, optimizar solamente la geometría
(Bowman et al., 2024)	CFD e inteligencia artificial	Reducción de costos computacionales	Mantiene el uso de CFD	Sustituye simulaciones de alta fidelidad, por modelos híbridos

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

(Z. Liu et al., 2025)	IA aplicada a optimización hidráulica	Incremento del coeficiente de potencia, y reducción de cargas	Coincide con Park, en la importancia de la hidráulica	Introduce aprendizaje automático, como herramienta principal
(X. Liu et al., 2025)	IA aplicada a diseño mecánico	Optimización estructural eficiente	Coincide con Velásquez, en la importancia de la geometría	Utiliza aprendizaje automático, para diseño estructural
(Salinas-León & Ochoa-Correa, 2025)	Selección de emplazamientos	Viabilidad energética condicionada por el sitio	Enfatiza sostenibilidad, y rendimiento	Desplaza la discusión, desde la turbina hacia el recurso hídrico
(Restrepo-Zapata et al., 2025)	Sostenibilidad ambiental	Evaluación de impactos ecológicos	Reconoce potencial energético hidrocinético	Prioriza la sostenibilidad, sobre la eficiencia energética

Conclusiones

La evidencia científica publicada entre 2021 y 2026, demuestra que la optimización de turbinas hidrocinéticas, ha evolucionado hacia enfoques integrales, donde el diseño mecánico y la optimización hidráulica, dejan de considerarse procesos independientes. Los mayores incrementos de rendimiento, se obtuvieron cuando ambas dimensiones fueron abordadas de manera conjunta, particularmente mediante la integración de geometrías optimizadas, control avanzado del flujo, y herramientas computacionales de alta precisión.

La dinámica computacional de fluidos (CFD), se consolidó como la herramienta predominante, para el análisis, validación, y optimización de turbinas hidrocinéticas, su aplicación permitió identificar, configuraciones más eficientes, reducir incertidumbres de diseño, y anticipar el comportamiento hidrodinámico, bajo distintas condiciones operativas. No obstante, la incorporación reciente, de modelos basados en inteligencia artificial, evidencia una transición hacia metodologías más ágiles, y eficientes desde el punto de vista computacional.

En el ámbito mecánico, las mejoras más relevantes, se asociaron con la optimización geométrica de rotores y álabes, el empleo de configuraciones helicoidales, y la incorporación de criterios, de resistencia estructural dentro del proceso de diseño, estas estrategias, favorecieron un mejor equilibrio entre eficiencia energética, estabilidad operativa, y vida útil de los sistemas.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Desde la perspectiva hidráulica, el acondicionamiento del flujo mediante ductos, sistemas de aceleración, y optimización de parámetros hidrodinámicos, mostró una influencia directa sobre la capacidad de extracción energética, los estudios revisados coinciden en que, la adecuada gestión de fenómenos como turbulencia, estelas, y pérdidas hidráulicas, constituye uno de los factores más determinantes para mejorar el desempeño global de las turbinas.

La revisión permitió identificar, una tendencia clara hacia el desarrollo de sistemas hidrocinéticos inteligentes, donde convergen simulación avanzada, algoritmos de optimización, aprendizaje automático, y estrategias de control adaptativo, sin embargo, persiste una limitada validación en condiciones reales de operación, aspecto que continúa representando, una de las principales brechas de conocimiento dentro del campo.

Finalmente, sesulta pertinente profundizar en la aplicación de inteligencia artificial, aprendizaje automático, y gemelos digitales, para el diseño predictivo y la optimización dinámica de turbinas hidrocinéticas, pues, la evidencia reciente indica que, estas tecnologías poseen un potencial considerable para reducir tiempos de desarrollo, y mejorar la precisión de las decisiones de diseño.

Referencias bibliográficas

Ai, K., Wang, M., Wang, D., Wang, H., Cao, R., & Avital, E. (2021). Numerical Study of A Generic Tidal Turbine Using BEM Optimization Methods. *China Ocean Engineering*, *35*(3), 344-351. https://doi.org/10.1007/s13344-021-0032-1

Alhousni, F. K., Nwokolo, S. C., Meyer, E. L., Alsenani, T. R., Alhinai, H. A., Ahia, C. C., Okonkwo, P. C., & Ahmed, Y. E. (2025). Multi-scale computational fluid dynamics and machine learning integration for hydrodynamic optimization of floating photovoltaic systems. *Energy Informatics*, *8*(1), 103. https://doi.org/10.1186/s42162-025-00567-9

Betancur Gómez, J. D., Ardila Marín, J. G., & Chica Arrieta, E. L. (2023). Numerical and experimental performance analysis of a horizontal axis hydrokinetic turbine. *Journal of Applied Research and Technology*, *21*(6), 965-974. https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2023.21.6.1996

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Boretti, A., & Castelletto, S. (2025). Advancements and challenges in tidal stream and oceanic current turbines: An overview of current technologies and future prospects. *Marine Development*, *3*(1), 10. https://doi.org/10.1007/s44312-025-00054-5

Bowman, J., Bhushan, S., Burgreen, G., & Dettwiller, I. (2024). A Machine-Learned Actuator Line Model for Hydrokinetic Turbines. *Volume 2: Computational Fluid Dynamics (CFDTC); Micro and Nano Fluid Dynamics (MNFDTC); Flow Visualization*, V002T05A028. https://doi.org/10.1115/FEDSM2024-131429

Fekiač, J. J., Krbata, M., Kohutiar, M., Janík, R., Kakošová, L., Breznická, A., Eckert, M., & Mikuš, P. (2025). Comprehensive Review: Optimization of Epoxy Composites, Mechanical Properties, & Technological Trends. *Polymers*, *17*(3), 271. https://doi.org/10.3390/polym17030271

Gong, X., Ge, W., Yan, J., Zhang, Y., & Gongye, X. (2020). Review on the Development, Control Method and Application Prospect of Brake-by-Wire Actuator. *Actuators*, *9*(1), 15. https://doi.org/10.3390/act9010015

Gu, Y., Zou, T., Liu, H., Lin, Y., Ren, H., & Li, Q. (2024). Status and Challenges of Marine Current Turbines: A Global Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, *12*(6), 884. https://doi.org/10.3390/jmse12060884

Ileberi, G. R., & Li, P. (2023). Integrating Hydrokinetic Energy into Hybrid Renewable Energy System: Optimal Design and Comparative Analysis. *Energies*, *16*(8), 3403. https://doi.org/10.3390/en16083403

Jiang, B., Amini, M. R., Liao, Y., Martins, J. R. R. A., & Sun, J. (2022). Control Co-Design of a Hydrokinetic Turbine With Open-Loop Optimal Control. *Volume 8: Ocean Renewable Energy*, V008T09A006. https://doi.org/10.1115/OMAE2022-81006

Lakatos, G. D., Albu (Druța), R. M., Rhazzali, A. L., Ferenci, S., Cioca, L. I., Munteanu, R. A., & Szabó, L. (2026). The Role of Hydraulic Turbines in the Energy Transition: A Systematic Review of Methods for Evaluating and Optimizing Hydropower Plant Operation. *Processes*, *14*(5), 841. https://doi.org/10.3390/pr14050841

Liu, X., Hu, J., Zhang, Y., Yu, H., Shen, W., Xu, Y., & Zheng, J. (2025). Structural Optimization of a Pipeline Savonius Hydro Turbine Based on Broad Learning. *Applied Sciences*, *15*(16), 9181. https://doi.org/10.3390/app15169181

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Liu, Z., Zheng, Y., Zhang, Y., & Xu, J. (2025). MLP-Optimized Duct Design for Enhanced Hydrodynamic Performance in Tidal Turbines. *Water*, *17*(18), 2691. https://doi.org/10.3390/w17182691

Nekahi, A., Anil Kumar, M. R., Deng, S., Li, X., Petropoulos, A., Nanda, J., & Zaghib, K. (2025). Toward Green Renewable Energies and Energy Storage for the Sustainable Decarbonization and Electrification of Society. *Electrochemical Energy Reviews*, *8*(1), 12. https://doi.org/10.1007/s41918-025-00247-y

Park, J., Knight, B. G., Liao, Y., Mangano, M., Pacini, B., Maki, K. J., Martins, J. R. R. A., Sun, J., & Pan, Y. (2023). CFD-based design optimization of ducted hydrokinetic turbines. *Scientific Reports*, *13*(1), 17968. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43724-4

Restrepo-Zapata, K., Betancour-Osorio, J., & Rubio-Clemente, A. (2025). *Turbinas hidrocinéticas: Características, principio de funcionamiento e impactos ambientales asociados*. *24*(4), 91-106.

Salinas-León, C. D., & Ochoa-Correa, D. (2025). Multicriteria analysis for the site selection of hydrokinetic turbines-HKT for renewable energy generation: A case study in Ecuador. *Renewable Energies*, *3*(1), 27533735251340200. https://doi.org/10.1177/27533735251340200

Song, K., Yao, J., Huan, H., Wei, L., & Liu, Q. (2026). Research Progress of Archimedes Spiral Hydrokinetic Turbines in Free-Flow Conditions: A Comprehensive Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, *14*(15), 1449. https://doi.org/10.3390/jmse14151449

Velásquez, L., Rengifo, J., Saldarriaga, A., Rubio-Clemente, A., & Chica, E. (2025). Optimization of Vertical-Axis Hydrokinetic Turbines: Study of Various Geometric Configurations Using the Response Surface Methodology and Multi-Criteria Decision Matrices. *Processes*, *13*(7), 1950. https://doi.org/10.3390/pr13071950

Yang, R., Cui, T., Chen, Z., Ma, S., Ping, H., Wei, F., Gao, Z., Lu, G., Liu, H., & Zhang, L. (2026). Review on Dynamic Inflow Sensing Layout Optimization for Large-Scale Wind Farms: Wake Modeling, Data-Driven Prediction, and Multi-Objective Uncertainty Optimization. *Energies*, *19*(3), 810. https://doi.org/10.3390/en19030810

Zemanová, L., & Rudolf, P. (2020). Flow Inside the Sidewall Gaps of Hydraulic Machines: A Review. *Energies*, *13*(24), 6617. https://doi.org/10.3390/en13246617

.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Zhong, S., Jin, G., Chen, Y., Ye, T., & Zhou, T. (2025). Review of Vibration Analysis and Structural Optimization Research for Rotating Blades. *Journal of Marine Science and Application*, *24*(1), 120-136. https://doi.org/10.1007/s11804-024-00405-6

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional