

## **Tendencias, avances y desafíos de las pequeñas centrales hidroeléctricas: una revisión sistemática con aplicación complementaria en una micro hidroeléctrica**

*Jackson Yair Rentería Palacios, Andres Julian Aristizbal Cardona y Edinson Banguero Palacios*

*Grupo de Investigación en Energías Renovables-GIERMET, Universidad Tecnológica del Chocó, Facultad de Ingeniería, Cra. 22 No 18B-10B, Quibdó, Colombia.*

*Proyecto: “Desarrollo de capacidades científicas para la investigación de procesos de deterioro de la infraestructura en sistemas de energías renovables en el departamento del Chocó.”*

### **Resumen**

Este trabajo presenta una revisión exhaustiva de la literatura científica reciente sobre pequeñas centrales hidroeléctricas (2014–2026), abordando seis ejes temáticos: tecnologías aplicadas, costos, modelado, tendencias en el mercado, políticas y regulación, e impactos ambientales. Los resultados muestran que la evolución de las PCH se caracteriza por mejoras en eficiencia hidráulica, modularidad, automatización y reducción de costos, acompañadas del uso creciente de herramientas de simulación para optimizar el diseño y la operación de estos sistemas. Paralelamente, se evidencia que, pese a tener un perfil de impacto relativamente bajo, las PCH pueden generar alteraciones importantes en caudales ecológicos, conectividad fluvial y biodiversidad, especialmente cuando se instalan múltiples proyectos en una misma cuenca. Además, como aplicación práctica de los conceptos revisados, se desarrolló el caso de estudio de la Micro Central Hidroeléctrica *Juntas del Tamaná*, ubicada en una zona rural del municipio de Nóvita (Chocó). El análisis incluyó la descripción técnica de la infraestructura hidráulica y electromecánica, y la propuesta de un sistema completo de telemetría para monitorear caudal, variables eléctricas y parámetros ambientales mediante sensores especializados. De esta manera, el estudio ofrece una visión holística del estado actual de las PCH, identifica oportunidades para mejorar su sostenibilidad técnica y ambiental, y resalta el papel crucial de estas tecnologías en la electrificación rural y la transición energética.

**Palabras Clave:** Pequeña hidroeléctrica, micro hidroeléctrica, impactos ambientales, modelos, tendencias globales, políticas, tecnologías.

## 1. Introducción

La energía hidroeléctrica constituye una de las fuentes renovables más consolidadas y de mayor capacidad instalada a nivel mundial, donde el interés por las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) ha crecido significativamente, impulsado por la necesidad de diversificar la matriz energética, promover la generación distribuida y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, a diferencia de las grandes represas, las PCH presentan menores impactos ambientales y sociales, requieren menor inversión inicial y pueden integrarse de manera más armónica en entornos rurales o de difícil acceso. Estas características las posicionan como una alternativa estratégica en el contexto de la transición energética global.

Sin embargo, el desarrollo de las PCH no está exento de desafíos, ya que las condiciones hidrológicas variables, los altos costos de mantenimiento en zonas remotas, la limitada estandarización tecnológica y las restricciones regulatorias representan barreras importantes para su expansión sostenible. También, aunque las PCH suelen considerarse ambientalmente benignas, su implementación puede generar alteraciones ecológicas locales —como la fragmentación

del hábitat fluvial o la modificación del caudal ecológico—, lo que exige una evaluación integral de sus impactos.

Por otra parte, en el ámbito técnico las innovaciones recientes en diseño hidráulico, materiales y automatización han mejorado la eficiencia y la confiabilidad de las PCH. Paralelamente, los avances en modelado hidrológico y energético permiten optimizar su desempeño y prever escenarios de operación bajo condiciones de cambio climático. A nivel económico, la disminución de los costos de equipos modulares y la aparición de nuevos modelos de negocio descentralizado están transformando el mercado global de pequeñas hidroeléctricas.

Pese a este creciente interés, la literatura actual sobre PCH se encuentra fragmentada entre estudios técnicos, económicos y ambientales, sin una revisión integral que sintetice sus principales avances y limitaciones. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo revisar y clasificar la producción científica reciente (2014–2026) publicada principalmente en Elsevier, analizando las tendencias en tecnología, costos, impacto ambiental, modelado, gestión y políticas, y tendencias actuales de las pequeñas centrales

hidroeléctricas. Asimismo, se incorpora un caso de estudio aplicado sobre una micro central hidroeléctrica, con el objetivo de demostrar cómo los conceptos analizados en la literatura se integran en el diseño y operación de este tipo de sistemas. De esta forma, esta revisión busca proporcionar una

## 2. Metodología

Esta revisión se desarrolló bajo un enfoque sistemático y reproducible con el propósito de sintetizar el conocimiento científico actual relacionado con pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), considerando cinco dimensiones principales del tema: tecnología, costos, impacto ambiental, modelado, gestión y políticas, así como tendencias de implementación y mercado. La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo exclusivamente en la base de datos ScienceDirect (Elsevier), seleccionada debido a su amplia cobertura en áreas de ingeniería, ciencias de la energía y sostenibilidad. Además, para garantizar una perspectiva actual y evolutiva, se incluyeron únicamente publicaciones realizadas entre los años 2014 y 2026.

La estrategia de búsqueda se basó en combinaciones de palabras clave en inglés y español, empleadas tanto en títulos, resúmenes como en palabras clave de los artículos identificados. Entre los términos

visión holística del estado actual del conocimiento con respecto a las PCH, identificar vacíos de investigación y ofrecer elementos de referencia para el desarrollo de proyectos más eficientes, sostenibles y adaptados a las condiciones locales.

utilizados se incluyen: "*small hydropower*", "*mini hydro*", "*micro hydro*", "*technology*", "*design*", "*turbine*", "*cost*", "*economic analysis*", "*CAPEX*", "*OPEX*", "*environmental impact*", "*sustainability*", "*LCA*", "*modeling*", "*simulation*", "*hydrological model*", etc. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron filtrados para asegurar la inclusión exclusiva de artículos revisados por pares y con un enfoque práctico, técnico o aplicado.

Los criterios de selección se definieron de la siguiente manera: se incluyeron artículos publicados en revistas indexadas (Q1–Q2), estudios que abordaran o describieran proyectos de PCH y aquellos que presentaran información técnica, económica o ambiental verificable. Por el contrario, se excluyeron tesis, documentos no revisados por pares, reportes técnicos, publicaciones centradas en grandes presas y artículos sin claridad metodológica o sin respaldo empírico. Una vez aplicados estos criterios,

los artículos seleccionados ( $n \approx 73$ ) fueron clasificados en seis categorías temáticas: (1) tecnología, asociada a diseños hidráulicos, tipos de turbina y materiales innovadores; (2) costos, incluyendo inversión, operación, mantenimiento y análisis de ciclo de vida económico; (3) impacto ambiental, enfocado en ecosistemas, caudal ecológico y emisiones indirectas; (4) modelado, relacionado con modelos hidráulicos, energéticos, hidrológicos y de optimización; (5) gestión y políticas, que contempla marcos regulatorios e incentivos; y (6) tendencias en implementación y mercado. Cada artículo fue analizado conforme a su categoría predominante, país de estudio, metodología utilizada, resultados relevantes y limitaciones reportadas.

### **3. Resultados**

De acuerdo con la matriz de análisis bibliográfico que sintetiza la información principal de los artículos revisados e incluidos, se observa que existe una predominancia de estudios enfocados en impactos ambientales como se muestra en la Figura 1, que representan el 33% del total. Esta categoría es seguida por los trabajos que

Finalmente, el proceso metodológico se desarrolló en tres etapas: (a) identificación, donde se realizó la recopilación inicial de aproximadamente 134 documentos y la eliminación de duplicados; (b) selección, mediante lectura de títulos, palabras clave y resúmenes, con reducción de la muestra a 91 artículos; y (c) evaluación, que consistió en la lectura completa y extracción detallada de información, resultando en la selección final de 73 artículos. La información obtenida fue registrada y organizada en una matriz de análisis bibliográfico elaborada en Excel (Anexo 1), lo que permitió consolidar, comparar y sintetizar los hallazgos reportados por la literatura.

abordan tecnologías aplicadas en PCH, con un 18%, y por los estudios relacionados con tendencias en implementación y mercado, que alcanzan el 13%. Mientras que los artículos sobre costos de inversión y operación corresponden al 16%, mientras que modelado y simulaciones y gestión y políticas representan el 12% y el 8%, respectivamente.

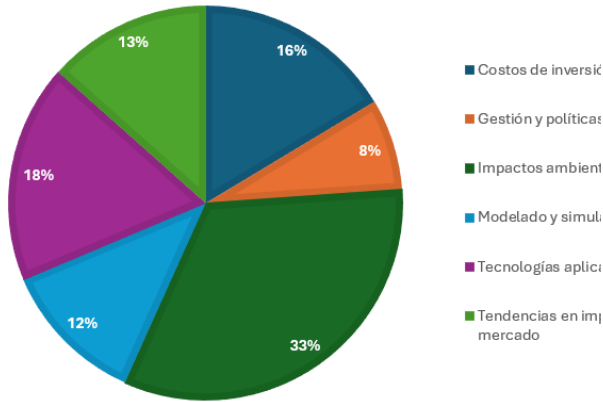


Figura 1. Artículos por categorías principales

Por otra parte, el segundo gráfico muestra la distribución de los artículos que abordan múltiples categorías simultáneamente. En este caso, se observa un

fuerte predominio de estudios que combinan impactos ambientales con modelado y simulaciones, que constituyen el 33%. Mientras que las demás combinaciones presentan proporciones equitativas del 17% cada una, destacando la interrelación entre temáticas como gestión y políticas con tendencias de mercado, impactos ambientales con tendencias de mercado, modelado con gestión, y tendencias de implementación con impactos ambientales. Esto evidencia que una parte significativa de la literatura no se limita a un enfoque único, sino que integra variables técnicas, políticas y ambientales.

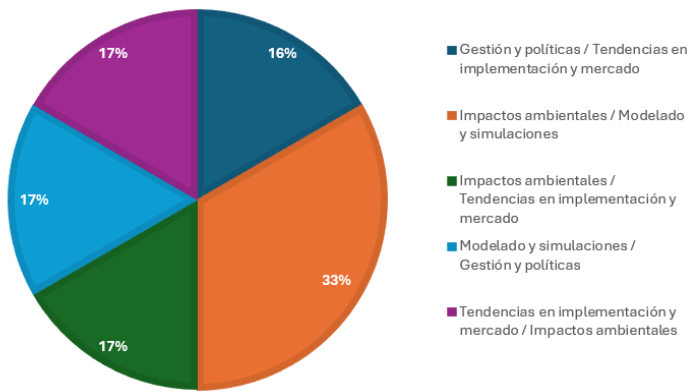


Figura 2. Artículos que se utilizaron en varias categorías

### 3.1. Tecnologías aplicadas en PCH

Algunos estudios señalan que la selección tecnológica en las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) se fundamenta principalmente en las

características hidráulicas del sitio, especialmente el salto y el caudal disponible. Además, se evidenció una amplia diversidad de turbinas aplicables a diferentes rangos operativos, cuyas características se sintetizan

en la Tabla 1. Entre las opciones más utilizadas destacan las turbinas Pelton, Francis, Kaplan, Crossflow, propela, tornillo de Arquímedes, Turgo y las bombas operadas como turbinas (PAT), cada una con

condiciones particulares de eficiencia, rango de operación y costos asociados, tal como señalan Bekker et al. (2022), Chen & Engeda (2020), Puschnigg et al. (2025) y Yah et al. (2017).

**Tabla 1.**

*Características por tipo de turbina*

<b>Tipo de turbina</b>	<b>Rango de salto (head)</b>	<b>Rango de caudal</b>	<b>Características principales y aplicaciones recomendadas</b>
Pelton	Alto (>40 m, hasta 2000 m)	Bajo a medio	Turbina de impulso, ideal para altos saltos y bajos caudales; eficiencia de hasta 95%
Francis	Medio (8–300 m, hasta 600 m)	Medio	Turbina de reacción, adecuada para saltos y caudales intermedios; alta eficiencia y robustez
Kaplan	Bajo (2–40 m, hasta 70 m)	Alto	Turbina de reacción, óptima para bajos saltos y altos caudales; eficiencia de 90–93%, adecuada para caudales variables
Crossflow (Michell-Banki)	Bajo a medio (hasta 40 m)	Variable	Turbina de impulso de bajo costo, recomendada para pequeños caudales y saltos bajos; amplia gama de aplicación en pequeños ríos
Propela	Bajo (<40 m)	Alto	Turbina de reacción, similar a la Kaplan pero con menor capacidad de adaptación a caudales variables
Tornillo de Arquímedes	Muy bajo (<10 m)	Alto	Adecuada para saltos muy bajos y grandes caudales, especialmente en aplicaciones de baja potencia
Turgo	Medio (15–300 m)	Medio	Turbina de impulso, alternativa a la Pelton para saltos medios
PAT (Pump-as-Turbine)	Medio (13–100 m)	Variable	Bombas usadas como turbinas, opción económica para pequeñas instalaciones, eficiencia de 70–85%

En términos de innovación tecnológica, la literatura reciente destaca

importantes avances orientados a mejorar la eficiencia y reducir los costos de operación y

mantenimiento en las PCH; entre ellas sobresalen las turbinas de velocidad variable (Suraparaju et al., 2025), los turbo-generadores sumergibles tipo “bulbo” para bajos saltos, y las turbinas amigables con los peces, diseñadas para disminuir la mortalidad ictiológica (Othman et al., 2025). También se identifican mejoras significativas en la estandarización de componentes, en el uso de materiales anticorrosivos y polímeros avanzados (Li et al., 2018), y en la rehabilitación de infraestructura existente, lo que ha permitido extender la vida útil de centrales antiguas y disminuir costos de inversión.

Asimismo, la revisión reveló avances sustanciales en automatización, digitalización y monitoreo remoto. Siendo la integración de sistemas SCADA, dispositivos IoT y plataformas de telemetría aquellas que han permitido la operación desatendida, el mantenimiento predictivo y la gestión eficiente mediante el análisis de datos en tiempo real (Suraparaju et al., 2025). Además, estas tecnologías contribuyen a

### **3.2. Costos de inversión y operación**

Los costos asociados a la construcción y operación de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) varían ampliamente

optimizar el desempeño energético y a mejorar la confiabilidad operativa en escenarios con variaciones hidrológicas o restricciones de acceso (Othman et al., 2025).

Finalmente, se identificaron diversas limitaciones técnicas que afectan la escalabilidad y viabilidad económica de las PCH, donde se destacan los altos costos de turbinas diseñadas para baja potencia, la falta de datos hidrológicos de largo plazo (Allouhi, 2024), la menor eficiencia promedio frente a las grandes hidroeléctricas (Safdar et al., 2020), la dependencia de configuraciones run-of-river durante periodos de estiaje (Safdar et al., 2020), (Duran & Sahinyazan, 2021) y las restricciones regulatorias derivadas de la ausencia de estándares unificados para su clasificación (S. Kumar & Madlener, 2016). Igualmente, se registran desafíos ambientales persistentes relacionados con la sedimentación, el mantenimiento del caudal ecológico y la construcción de obras civiles en entornos sensibles (Uniyal et al., 2025).

según las características del sitio, el contexto geográfico y las particularidades tecnológicas del proyecto. En la literatura, estos costos se

dividen comúnmente en CAPEX (Capital Expenditure) y OPEX (Operational Expenditure), donde el CAPEX corresponde a la inversión inicial requerida para desarrollar o mejorar la planta, incluyendo los costos de obras civiles, equipos electromecánicos, instalación, estudios técnicos, financiamiento y capital de operación (Ali et al., 2023), (Otto et al., 2026), (Deveci et al., 2020). Por su parte, el OPEX agrupa los costos recurrentes de operación y mantenimiento, los cuales suelen expresarse como un porcentaje del CAPEX o como un valor anual por kW instalado (Ali et al., 2023), (Otto et al., 2026), (Deveci et al., 2020).

En términos de inversión inicial, los estudios reportan que para PCH con capacidades entre 1 y 10 MW, el costo promedio ponderado global se sitúa entre 0.02 y 0.13 USD/kWh para nuevas instalaciones (Ali et al., 2023). De manera más específica, se ha documentado un CAPEX cercano a 1100 €/kW en un proyecto hidroeléctrico de almacenamiento en Grecia, encontrándose en el rango inferior para desarrollos de características similares comparables (Otto et al., 2026). Los costos de

operación y mantenimiento muestran menor dispersión: típicamente se estiman entre 2% y 6% del CAPEX (Ali et al., 2023), (Otto et al., 2026), con valores reportados de 52 USD/kW/año en diversos estudios. En el caso de Grecia, el OPEX anual oscila entre 3% y 5% del CAPEX, con una distribución interna que asigna entre 0.5% y 1.5% a costos de construcción y entre 2.5% y 3.5% a equipos electromecánicos (Otto et al., 2026). Otras investigaciones señalan rangos de 1.52% a 4.5% del CAPEX, reflejando diferencias metodológicas y variaciones geográficas (Costa et al., 2026).

Por otra parte, las variaciones de costos en PCH está dominada por factores relacionados con la infraestructura y las obras civiles, seguidos por los costos de equipos electromecánicos, la accesibilidad al sitio y los requerimientos regulatorios, en donde la especificidad del sitio y la capacidad instalada son determinantes clave en la magnitud de estos costos, y la regulación puede añadir variabilidad significativa dependiendo de la región y el contexto del proyecto. Lo anterior se describe a detalle en la Tabla 2.

**Tabla 2.***Factores en la variación de costos.*

<b>Factor</b>	<b>Grado de Influencia</b>	<b>Comentarios Clave</b>
Obras civiles/infraestructura	Muy alto	Principal fuente de variación, altamente dependiente del sitio y topografía
Equipos electromecánicos	Alto	Representa 30-40% del costo total, siendo más alto en microcentrales con un aumento del 60-70%
Transporte y accesibilidad	Moderado-alto	Aumenta en sitios remotos o de difícil acceso
Regulación y factores externos	Moderado	Costos adicionales por normativas ambientales y sociales
Materiales	Moderado	Depende del tipo de obra y condiciones locales

*Nota.* Abdullah & Glasscock (2025)

Comparativamente, en relación con otras fuentes de energía renovable, las PCH se posicionan como una de las tecnologías

más competitivas en términos de costo de producción (Tabla 3) y costo de instalación (Tabla 4).

**Tabla 3.***Costos de producción (US\$/MWh y US¢/kWh)*

<b>Fuente</b>	<b>Costo (US\$/MWh)</b>	<b>Costo (US¢/kWh)</b>
Pequeña hidro	34.48	5–12 (hasta 40)
Eólica	54.19	4–16
Solar FV	128.07	9–40
Biomasa	—	5.5–20

*Nota.* Spänhoff (2014)**Tabla 4.***Costos de instalación (USD/kW)*

<b>Fuente</b>	<b>Costo (USD/kW)</b>
Pequeña hidro	600–8000
Solar FV	2000–6000
Eólica terrestre	1500–2000
Eólica marina	3500

*Nota.* K. Kumar & Saini (2022) y Zhou et al. (2019)

En términos de operación y mantenimiento, las PCH muestran costos relativamente bajos, generalmente entre **1% y 4% del CAPEX**, con un promedio global cercano al **2.5%**, lo que las hace competitivas frente a otras renovables (Nguyen et al., 2019), (Tazikeh et al., 2025). Aunque la inversión inicial en hidroeléctricas suele ser elevada debido a las obras civiles, sus bajos

### **3.3. Impactos ambientales**

Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) generan impactos ambientales relevantes tanto a nivel local como de cuenca ya que los estudios revisados reportan que los efectos más frecuentes se concentran en la alteración del régimen hidrológico (Laks et al., 2023), (Virah-Sawmy & Sturmberg, 2025), la

De esta manera, las PCH provocan alteraciones directas en componentes hidrológicos como caudales mínimos, frecuencia de pulsos bajos y tasas de ascenso/descenso, especialmente en esquemas de derivación o almacenamiento temporal; siendo estas modificaciones correlacionadas con reducciones en la diversidad y abundancia de peces,

costos de operación permiten una generación energética económica en el largo plazo (Ugwu et al., 2022). De hecho, en condiciones favorables, los costos de instalación pueden recuperarse en un periodo de dos a tres años desde el inicio de la operación comercial, dependiendo del precio de la energía y del régimen hidrológico local (Zhou et al., 2019).

fragmentación de la conectividad fluvial, la degradación de hábitats, la simplificación de las comunidades biológicas y cambios en la calidad del agua (Kuriqi et al., 2021), (Laks et al., 2023). Estos impactos se observaron de manera consistente en diferentes regiones geográficas y bajo distintos tipos de configuración hidráulica.

macroinvertebrados y macrófitas, así como con procesos de retención de sedimentos aguas arriba y empobrecimiento de hábitats aguas abajo (Kuriqi et al., 2021), (Laks et al., 2023). A nivel indirecto, se identificaron impactos relacionados con el consumo de recursos y las emisiones durante el ciclo de vida (Tefferu et al., 2020), así como procesos de eutrofización y efectos acumulativos

cuando varias PCH se encuentran instaladas dentro de una misma cuenca (Piper et al., 2018), (Virah-Sawmy & Sturmberg, 2025).

En este sentido, la pérdida de conectividad fluvial se evidenció como uno de los efectos más significativos; siendo en algunos casos, la fragmentación causada por múltiples PCH y alcanzando niveles superiores a los generados por grandes embalses de capacidad equivalente. También,

la disminución en la conectividad se asoció con cambios en la dispersión de macroinvertebrados (Sofi et al., 2022), (Lin et al., 2025), (Qi et al., 2024), filtrado de rasgos funcionales en peces y alteraciones en la composición microbiana en biofilms (Gao et al., 2025). La relación entre estos efectos y la posición del proyecto dentro del sistema fluvial se sintetiza en la Tabla 5, la cual muestra variaciones en el nivel de impacto según el tramo del río.

**Tabla 5.**

*Impactos según tramo del río*

<b>Tramo del río</b>	<b>Impacto en caudal ecológico</b>	<b>Impacto en conectividad</b>	<b>Cambios en biota</b>
Aguas arriba	Bajo	Bajo	Mínimos
Embalse	Alto	Alto	Cambios significativos
Desaguado	Moderado (mitigable)	Moderado	Reducción de dispersión y alteraciones fisicoquímicas
Aguas abajo	Bajo (si hay e-flows)	Bajo	Mínimos

*Nota. Lin et al. (2025), Qi et al. (2024), Gao et al. (2025), He et al. (2025) y Wang et al. (2021)*

Del mismo modo, los estudios identificaron una amplia variedad de metodologías para evaluar los impactos ambientales, que incluyen herramientas normativas (EIA), técnicas de ciclo de vida (LCA), sistemas multicriterio e indicadores de sostenibilidad, así como análisis espaciales

mediante SIG y sensores remotos. La Tabla 6 resume estas metodologías junto con sus aplicaciones principales, tipos de indicadores y software comúnmente empleados. Así, esta diversidad metodológica refleja la complejidad inherente a la evaluación ambiental de las PCH y la necesidad de

enfoques integrados para la toma de decisiones.

**Tabla 6.**

*Metodologías para evaluar el impacto ambiental*

Metodología/Herramienta	Aplicación Principal	Ejemplo de Software/Indicador	Aspectos Evaluados
EIA	Predicción y mitigación de impactos	-	Parámetros hidrometeorológicos, estándares internacionales
LCA	Impacto ambiental en todo el ciclo de vida	SimaPro, ReCiPe, IPCC	Huella de carbono, agua, ecotoxicidad, salud
Multicriterio/Indicadores	Evaluación de sostenibilidad y riesgos	WSM, AHP, matrices, índices verdes	Caudal ecológico, conectividad, biodiversidad
GIS/Remote Sensing	Análisis espacial de impactos	QGIS, terra (R)	Área de impacto, superposición con hábitats

*Nota. Punys (2025), Hedger et al. (2025), Tahseen & Karney (2017), Shiji et al. (2021), Mahmud et al. (2019), Caetano et al. (2024) y Atkins (2020).*

Finalmente, las investigaciones indican que las estrategias de mitigación más efectivas combinan soluciones estructurales (pasos para peces, turbinas amigables con la fauna, rejillas autolimpiantes) con medidas no estructurales (establecimiento de caudales ecológicos, regulación operativa y restauración de hábitats) (Sasthav & Oladosu, 2022), (Kuriqi et al., 2021), (Olivares et al.,

2021). La literatura también resalta el papel de la compensación ecológica (Yu & Xu, 2016), (Yu et al., 2016), la participación de actores locales y el uso de modelos de optimización (Singh & Singal, 2017), (Gasparatos et al., 2017) para minimizar impactos y mejorar el desempeño ambiental del proyecto.

### 3.4. Modelado y simulaciones

La revisión de la literatura muestra que el diseño, evaluación y optimización de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) se apoya en cuatro grandes tipos de modelos: hidráulicos, energéticos, económicos/financieros y multicriterio. Primero, los modelos hidráulicos son los más ampliamente utilizados y permiten simular el comportamiento del flujo, analizar pérdidas de carga, estimar el rendimiento de turbinas y evaluar la estabilidad del sistema hidráulico (Nedaei et al., 2025). Por su parte, los modelos energéticos, se enfocan en predecir la producción anual, optimizar la operación y estimar la contribución energética al sistema, integrando restricciones hidrológicas y tecnológicas (Singh & Singal, 2017), (Zahedi et al., 2022), (Mukhopadhyay et al., 2025), (Fernandez Vazquez et al., 2026). Mientras que los modelos económicos y financieros complementan el análisis mediante la estimación de costos, evaluación de riesgos y proyección de indicadores como el VAN o la TIR (Zhang et al., 2020). Finalmente, los modelos de decisión y análisis multicriterio incorporan variables técnicas, ambientales, sociales y económicas para evaluar la sostenibilidad integral de los proyectos (Singh & Singal, 2017), (Zhang et al., 2020), (Raja Abd Jalil et al., 2026).

En cuanto a las herramientas de software, se identifican más de cuarenta plataformas utilizadas en el sector, destacándose PEACH, HES, SMART MINI IDRO, SIMAHPP, HOMER, ProteusDS, entre otros. Estas herramientas permiten desde análisis preliminares simples hasta simulaciones avanzadas de dinámica hidráulica, evaluación ambiental y optimización operativa. Además, varias de ellas integran módulos específicos para *in-conduit hydropower* y para el análisis de caudales ecológicos, lo que refleja la creciente necesidad de considerar variables ambientales en etapas tempranas del diseño (Punys, 2025).

Las aplicaciones principales del software incluyen:

1. **Identificación de sitios**, mediante GIS, bases de datos hidrológicas y sistemas de soporte de decisiones (Bayazit et al., 2017), (Azimov & Avezova, 2022).
2. **Evaluación técnica y económica preliminar**, que orienta la selección de alternativas antes de estudios de campo (Bayazit et al., 2017).
3. **Análisis ambiental**, incluyendo evaluación de impactos y caudal ecológico (Punys, 2025).
4. **Simulación y optimización operativa**, con herramientas para modelar la integración a la red y pronosticar generación.

5. **Análisis multicriterio**, necesario para escenarios donde existen conflictos entre generación y conservación (Punys, 2025).

Por otro lado, la tabla 7 muestra que los parámetros principales para la optimización son el caudal, la altura neta, el tipo y dimensiones de la turbina, el costo total del proyecto, el precio de la energía y los

indicadores económicos (VAN, TIR). En el plano ambiental, se destacan el caudal ecológico, las características hidrogeológicas y la variabilidad hidrológica. Finalmente, la incertidumbre —especialmente hidrológica y económica— aparece como un elemento transversal que afecta el rendimiento esperado y la viabilidad del proyecto (Li et al., 2024).

**Tabla 7.**

*Variables o parámetros más relevantes en los modelos de optimización*

<b>Categoría</b>	<b>Parámetros principales</b>
Técnicos	Caudal, altura, tipo/dimensión de turbina, diámetro de tubería, número de unidades
Económicos	Costo de instalación/operación, precio de energía, VAN, TIR, flujos de caja
Operativos	Política de operación, maximización de generación, confiabilidad/disponibilidad
Ambientales/sitio	Caudal ecológico, calidad de agua, idoneidad del sitio, condiciones hidrogeológicas
Incertidumbre	Variabilidad hidrológica, precios de energía, modelado y descomposición computacional

*Nota. Singh & Singal (2017), Li et al. (2024).*

Por tanto, los estudios indican que los modelos aplicados a PCH han evolucionado hacia enfoques integrados, capaces de considerar simultáneamente aspectos

técnicos, económicos, ambientales y de incertidumbre, superando las aproximaciones puramente hidráulicas que tradicionalmente dominaban el sector.

### **3.5. Gestión y políticas**

Durante la revisión de la literatura se evidencio que el marco regulatorio de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH)

presenta una notable heterogeneidad entre regiones, tanto en los criterios técnicos como en los ambientales, económicos y

administrativos que rigen su implementación. Por ejemplo, en la Unión Europea las PCH se enmarcan principalmente en la *Renewable Energy Directive* y en políticas de apoyo como los *Feed-in Tariffs*, que incentivan su despliegue mediante pagos preferenciales. Sin embargo, el componente ambiental adquiere un papel central debido a la *Water Framework Directive (WFD)*, que exige mantener y restaurar el buen estado ecológico de los cuerpos de agua. Entonces, esto obliga a los países miembros a integrar la gestión de cuencas, establecer redes de monitoreo y aplicar límites de capacidad instalada o beneficios adicionales solo para plantas consideradas de bajo impacto (Xu & Ni, 2017).

Por otra parte, en China la *Renewable Energy Law* (2006) establece un marco sólido para la expansión de las PCH mediante tarifas incentivadas, exenciones tributarias y subsidios directos. Además, el país ha emitido más de treinta estándares técnicos para regular el desarrollo y mitigar los impactos ambientales y sociales. No obstante, la literatura reporta desafíos persistentes en financiamiento, aumento de costos y debilidades en el control ambiental, factores que han impulsado reformas institucionales y la cooperación internacional (Ming et al., 2015).

En Turquía, la Ley No. 5346 de Energía Renovable promueve la instalación de proyectos hidroeléctricos sin imponer límites de capacidad, aunque sí establece restricciones basadas en el tamaño del embalse (<15 km<sup>2</sup>), lo que ha fomentado la proliferación de instalaciones, pero ha generado tensiones con los estándares de la UE, que incluyen requisitos ambientales más estrictos. Igualmente, el país ha incorporado parcialmente la WFD y reconoce la necesidad de fortalecer su regulación y el monitoreo ambiental (Xu & Ni, 2017).

En este sentido, en Brasil se observa un fuerte crecimiento del sector impulsado por políticas nacionales y mecanismos de incentivo público-privado que han facilitado el aumento significativo de PCH, especialmente en regiones como la Amazonía, siendo estos incentivos clave para la expansión del sector durante las últimas dos décadas (Ferreira et al., 2016), (Athayde et al., 2019).

En Asia Central, la literatura identifica la urgencia de establecer estándares regionales y marcos intergubernamentales para garantizar coherencia técnica y regulatoria, especialmente debido a la naturaleza transfronteriza de los recursos hídricos. También, se destacan temas como la

gestión del riesgo, la planificación territorial y la implementación de soluciones modulares de generación (Azimov & Avezova, 2022).

Por su parte, estudios de otras regiones indican que, aunque las PCH suelen estar incluidas en los planes nacionales de energías renovables, pocas jurisdicciones cuentan con agencias especializadas o mecanismos institucionales específicos para su regulación. Entonces, la cooperación interinstitucional y la articulación sectorial son ampliamente recomendadas para mejorar la gobernanza y la sostenibilidad del sector (Idiaghe, 2018).

### **3.6. Tendencias en implementación y mercado**

Los datos recopilados muestran que la implementación y expansión del mercado de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) presenta un crecimiento sostenido a nivel global, impulsado tanto por su aplicabilidad en zonas remotas como por iniciativas de estandarización tecnológica.

En términos de despliegue mundial, China lidera ampliamente, con más de 85.000 unidades instaladas, consolidándose como el país con mayor adopción de PCH. Otros países en Asia y Oceanía, como India, Nepal

Finalmente, se identificó una falta de consenso internacional respecto a la definición de PCH, con diferencias significativas en los límites de capacidad (1–30 MW), lo que afecta la comparabilidad de marcos regulatorios y la aplicación homogénea de incentivos. En cuanto a los incentivos, se observa que mecanismos como tarifas preferenciales, subsidios y exenciones fiscales han sido efectivos para estimular la inversión en PCH en Europa, China y Brasil (Xu & Ni, 2017), (Athayde et al., 2019), (Spasenic et al., 2022).

y Australia, así como Canadá, también presentan avances importantes en su implementación (Motahari & Rahimpour, 2024).

Las PCH se emplean de manera predominante en comunidades rurales y aisladas, donde han demostrado ser una alternativa eficaz para la electrificación descentralizada gracias a su bajo impacto ambiental, costo relativamente reducido y facilidad para adaptarse a condiciones geográficas diversas (Motahari & Rahimpour, 2024), (Tiwari et al., 2020), (Đurin et al., 2022).

Además, el progreso tecnológico ha sido favorecido por iniciativas como el Standard Modular Hydropower Technology (SMH), que busca estandarizar y modularizar los componentes de las PCH para reducir costos, agilizar el despliegue y mejorar la escalabilidad del sistema (Tiwari et al., 2020).

En cuanto al mercado, la capacidad instalada de PCH ha presentado un crecimiento significativo:

- A nivel regional, la capacidad aumentó 46% entre 2011 y 2019, alcanzando 5,2 GW (Carvalho et al., 2020).
- Globalmente, se registró un incremento del 10% entre 2013 y 2019, alcanzando 78 GW (Akorede, 2022).
- Se identificaron 82.891 PCH en operación o construcción, con potencial de triplicarse si se aprovechan los recursos disponibles (Laks et al., 2023).
- El mercado global para PCH menores de 10 MW alcanzó un valor de 2.6 mil millones de dólares en 2019, con proyecciones de llegar a 3 mil millones en 2024 (Đurin et al., 2022).

Pese a este crecimiento, el 66% del potencial global continúa sin explotarse,

especialmente en África y Asia, donde existen abundantes recursos hidroeléctricos aún no desarrollados (Akorede, 2022), (Scotti & Bottarin, 2021), (Mishra et al., 2015).

En términos continentales, Asia concentra el 46,53% del potencial hidroeléctrico mundial, con China como líder en capacidad instalada y potencial disponible (Tefera & Kasiviswanathan, 2022), (Kong et al., 2016). América del Norte y del Sur aportan conjuntamente un 38,47%, destacándose Brasil, Canadá, Estados Unidos y Perú como referentes regionales (Tefera & Kasiviswanathan, 2022). África contribuye con un 11,4% del potencial mundial, siendo la República Democrática del Congo y Etiopía los países con mayor capacidad económicamente viable, aunque mayormente sin desarrollar (Tefera & Kasiviswanathan, 2022), (Franco et al., 2017). Finalmente, Europa muestra un escenario maduro, con un desarrollo del 85% del potencial en Europa Occidental y un promedio continental del 52%, liderado por Italia, República Checa, Rumanía, Polonia y Turquía (Spasenic et al., 2022).

## **Discusión**

### **4.1. Tecnologías aplicadas en PCH**

Los resultados obtenidos ponen en manifiesto que las tecnologías disponibles para las PCH han avanzado considerablemente, pero aún enfrentan barreras que limitan su implementación masiva. Por ejemplo, la diversidad de turbinas identificada refleja la adaptabilidad del sector a distintos escenarios hidrológicos; sin embargo, esta misma variedad genera retos en términos de costos y disponibilidad de equipos específicos para micro-potencias. Igualmente, la tabla de características por tipo de turbina confirma que la selección apropiada depende estrechamente de las condiciones del sitio, lo que implica que la eficiencia final del sistema está condicionada más por la adecuación tecnológica que por la potencia instalada en sí misma.

Por su parte, las innovaciones recientes, como las turbinas de velocidad variable o las turbinas amigables con los peces, evidencian un esfuerzo por aumentar la flexibilidad operativa y reducir los impactos ambientales. No obstante, su adopción sigue siendo limitada debido a los altos costos de fabricación y a la falta de economías de escala, un problema recurrente para proyectos de pequeña envergadura. Así, aunque las

soluciones tecnológicas existen, su viabilidad depende de la disponibilidad presupuestal y de incentivos adecuados.

Entonces, la digitalización y la automatización emergen como herramientas clave para superar varias de estas barreras, donde la incorporación de sistemas IoT, telemetría y SCADA no solo mejora la eficiencia y la confiabilidad, sino que también permite reducir costos derivados de la operación presencial. Sin embargo, la efectividad de estas tecnologías está condicionada por la calidad de los datos hidrológicos disponibles; sin registros de largo plazo, incluso los sistemas digitales más avanzados enfrentan incertidumbres significativas en la planeación y dimensionamiento de las plantas.

En cuanto a las limitaciones técnicas y ambientales, los hallazgos sugieren que las PCH continúan enfrentando desafíos estructurales relacionados con la sedimentación, la variabilidad estacional del caudal y la falta de criterios regulatorios homogéneos. Estas barreras no solo afectan la viabilidad técnica, sino también el acceso a financiación y la implementación de proyectos en zonas rurales o aisladas. Por ello, la literatura coincide en que el futuro del sector depende de avances simultáneos en

estandarización de equipos, investigación hidrológica y desarrollo de marcos normativos específicos.

#### **4.2. Costos de inversión y operación**

Los resultados obtenidos evidencian que, aunque las PCH requieren inversiones iniciales relativamente altas en comparación con otras tecnologías renovables, su competitividad económica se sostiene gracias a sus bajos costos de operación y mantenimiento y a su elevada vida útil, teniendo una marcada influencia en las obras civiles y los equipos electromecánicos en el CAPEX, ya que confirma que la hidroeléctrica en pequeña escala continúa siendo una tecnología altamente dependiente de las condiciones locales del sitio. Esto implica que su costo final no se determina únicamente por factores tecnológicos, sino también por elementos geográficos, topográficos y logísticos que pueden incrementar sustancialmente la inversión requerida.

La distribución del OPEX observada en diversos estudios sugiere cierta consistencia global, ya que los costos se mantienen generalmente en rangos estrechos entre el 2% y el 6% del CAPEX. Este patrón indica que, una vez superada la barrera de entrada asociada a la construcción, las PCH

ofrecen un esquema de operación estable y de bajo costo. Además, la evidencia de recuperaciones de inversión en plazos de dos a tres años refuerza la idea de que las PCH pueden constituirse en proyectos financieramente atractivos, especialmente en regiones con alta estabilidad hidrológica y precios energéticos favorables.

Por otra parte, la comparación con otras tecnologías renovables muestra que, pese a que la pequeña hidroeléctrica puede presentar rangos amplios de costos de instalación, sus costos de producción la ubican como una de las opciones más competitivas. Esto se debe principalmente a que, a diferencia de tecnologías como la solar FV o la eólica, las PCH no dependen de recursos intermitentes y pueden operar con altos factores de planta cuando las condiciones hidrológicas lo permiten.

No obstante, las variaciones en los costos señaladas en la tabla de factores muestran que las barreras económicas para la expansión de la PCH siguen vinculadas a la heterogeneidad de los sitios y a los requerimientos de infraestructura. La regulación ambiental y social también aparece como un factor que puede aumentar significativamente los costos, especialmente en regiones donde los requisitos son estrictos

o donde las comunidades locales demandan altos niveles de compensación e impacto mitigado.

### **4.3. Impactos ambientales**

En términos de impactos ambientales, aunque las PCH suelen ser consideradas alternativas de menor impacto en comparación con grandes hidroeléctricas, su efecto sobre la dinámica ecológica de los ríos puede ser significativo, especialmente cuando se instalan múltiples proyectos dentro de una misma cuenca (Virah-Sawmy & Sturmberg, 2025), (He et al., 2025), (Carolli et al., 2023), considerando que la evidencia coincide en que la alteración del régimen hidrológico y la pérdida de conectividad constituyen los impactos más determinantes, debido a su influencia directa en los procesos ecológicos y en la estructura de las comunidades acuáticas.

Por su parte, la comparación por tramo del río evidencia que los embalses funcionan como puntos críticos de impacto, donde se concentran la mayor parte de las alteraciones hidrológicas y ecológicas, lo cual se relaciona con la interrupción del flujo, la retención de sedimentos y la modificación física del hábitat. En contraste, los tramos aguas arriba y aguas abajo pueden mantener condiciones relativamente estables, siempre y

cuando se implementen medidas adecuadas de manejo del caudal ecológico. Estos hallazgos sugieren que la ubicación del proyecto dentro del sistema fluvial determina en gran medida la magnitud del impacto, lo cual debe ser considerado en la planificación y evaluación ambiental.

Además, se observa un patrón claro: la acumulación de múltiples PCH puede generar impactos equivalentes o superiores a los de grandes presas, particularmente en términos de fragmentación y cambios en la composición biológica, lo cual coincide con estudios que identifican reducciones en la dispersión de macroinvertebrados y peces, así como filtrado funcional y cambios en comunidades microbianas, evidenciando efectos complejos que trascienden las modificaciones puramente hidrológicas.

Un punto de discusión relevante es la existencia de resultados contradictorios en la literatura, mientras algunos autores señalan que las PCH no producen afectaciones significativas en la calidad del agua o en la supervivencia de especies bajo ciertas condiciones (Kong et al., 2016), la mayoría reporta impactos negativos sustanciales (Lin et al., 2025), (Sasthav & Oladosu, 2022), (He et al., 2025), (Wang et al., 2021), (Carolli et al., 2023). Esta discrepancia parece depender

de tres factores principales: (1) el diseño y operación de la central, (2) el contexto ecológico y geomorfológico, y (3) la densidad de proyectos en la cuenca. Por ello, es importante realizar evaluaciones caso a caso, evitando generalizaciones que puedan subestimar los riesgos ambientales.

Asimismo, la revisión de metodologías demuestra que no existe un único enfoque capaz de capturar la totalidad de los impactos, ya que la combinación de EIA, LCA, herramientas multicriterio y análisis espaciales mediante SIG permite una evaluación más robusta. Sin embargo, la variabilidad en los indicadores y escalas de análisis utilizada por los estudios limita la comparabilidad y la construcción de conclusiones globales. Por ello, se destaca la necesidad de marcos metodológicos estandarizados y de la integración de evaluaciones a escala de cuenca.

Finalmente, la literatura coincide en que la mitigación efectiva requiere enfoques integrales que combinen infraestructura adecuada, gestión operativa y participación social, debido a que las estrategias como los caudales ecológicos, los pasos de peces y la restauración de hábitats pueden reducir sustancialmente los impactos, pero su eficacia depende de una planificación

informada y del monitoreo continuo. En este sentido, la integración de modelos de optimización destaca como una tendencia emergente que permite mejorar simultáneamente el rendimiento energético y la protección ambiental.

#### **4.4. Modelado y simulaciones**

Los hallazgos de esta revisión evidencian una tendencia clara hacia la complejización y multidimensionalidad del modelado de PCH. Si bien los primeros estudios se centraban en análisis hidráulicos lineales, la literatura reciente incorpora modelos híbridos y multicriterio que buscan capturar la naturaleza sistémica del desarrollo hidroeléctrico a pequeña escala. Esta transición responde a la necesidad de equilibrar la eficiencia energética con la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica, especialmente en contextos donde las PCH se expanden a lo largo de un mismo sistema fluvial y generan impactos acumulativos.

Adicionalmente, un punto crítico identificado es que no existe un único modelo capaz de integrar de manera plena todas las dimensiones relevantes; más bien, los investigadores combinan herramientas hidráulicas (como HEC-RAS o SIMAHPP), software energético (HOMER) y plataformas

económicas (RETScreen, MATLAB) para construir evaluaciones más robustas, revelándose una fragmentación metodológica, que si bien permite flexibilidad, dificulta la estandarización de resultados y la comparabilidad entre estudios.

En cuanto al diseño y optimización, los estudios recientes destacan la importancia de incluir la incertidumbre hidrológica y la variabilidad climática, elementos que afectan directamente la confiabilidad y la rentabilidad de las PCH, pero sólo una fracción limitada de los modelos revisados incorpora análisis probabilísticos avanzados o simulaciones estocásticas, lo que sugiere un vacío metodológico relevante para futuras investigaciones.

Finalmente, la revisión también revela un aumento en el uso de modelos multicriterio como AHP, PROMETHEE o herramientas DSS integradas, lo cual está alineado con enfoques de planificación más participativos y sostenibles. De modo que, estos modelos permiten incluir restricciones ambientales, criterios sociales y regulaciones locales, favoreciendo decisiones más informadas y equilibradas. No obstante, su aplicación sigue siendo minoritaria frente a los modelos hidráulicos tradicionales.

#### **4.5. Gestión y políticas**

Los resultados revelan que el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas está fuertemente condicionado por políticas energéticas, requisitos ambientales y mecanismos de incentivo, lo que genera una compleja interacción entre objetivos de sostenibilidad, eficiencia económica y seguridad energética; donde la marcada variabilidad entre países demuestra que no existe un marco regulatorio universal, lo que dificulta la estandarización de buenas prácticas y la evaluación comparativa del desempeño de las PCH a nivel global.

Un hallazgo clave es la tensión entre incentivos económicos y exigencias ambientales ya que regiones como la Unión Europea han adoptado un enfoque más equilibrado, combinando estímulos financieros con estrictos requisitos ecológicos derivados de la WFD. Esto contrasta con modelos como el de Turquía o ciertas regiones de Brasil, donde la prioridad por aumentar la generación renovable ha derivado en procesos de expansión que, en algunos casos, no han incorporado mecanismos robustos de monitoreo ambiental o planes integrados de cuenca.

Por otra parte, los incentivos económicos (feed-in tariffs, subsidios, exenciones fiscales) han sido altamente eficaces para promover la instalación de PCH, especialmente en China y América Latina. Sin embargo, su éxito también ha generado desafíos asociados a la proliferación de plantas en ríos sensibles, lo que resalta la importancia de adoptar enfoques regulatorios basados en cuenca, en lugar de evaluar proyectos individualmente. Este aspecto es particularmente relevante considerando los impactos acumulativos que han sido reportados para las PCH en numerosos contextos.

Otro aspecto destacado es la falta de armonización internacional en la definición de PCH debido a que la ausencia de criterios uniformes sobre capacidad, requisitos de infraestructura y límites de impacto dificulta el intercambio de experiencias regulatorias y la transferencia tecnológica entre países. Esto también representa un obstáculo para establecer estándares globales de sostenibilidad que puedan guiar la planificación del sector.

Asimismo, regiones como Asia Central ejemplifican la importancia de la cooperación transfronteriza, especialmente en cuencas compartidas donde la

planificación aislada resulta insuficiente para garantizar la seguridad hídrica y energética. Además, esta necesidad de cooperación se extiende a temas como la adaptación ante el cambio climático, la gestión de riesgos y la planificación territorial.

#### **4.6. Tendencias en implementación y mercado**

En esta categoría, los resultados reflejan una expansión sostenida y geográficamente diversa del mercado de PCH, impulsada por factores económicos, tecnológicos y de sostenibilidad; logrando una notable concentración de instalaciones en China que responde tanto a políticas de incentivo como a la necesidad de electrificar amplias zonas rurales con una fuente renovable y de bajo impacto. Sin embargo, el liderazgo asiático también revela un desequilibrio en la distribución global del desarrollo hidroeléctrico, evidenciando que regiones con potencial significativo — particularmente África y parte de Asia— permanecen rezagadas a pesar de contar con condiciones naturales favorables.

Por su parte, el avance de las PCH en comunidades aisladas pone de manifiesto la relevancia estratégica de este tipo de tecnología en escenarios donde la conexión a redes eléctricas convencionales resulta

inviabile o demasiado costosa, ya que su flexibilidad, modularidad y menor impacto ambiental las posicionan como una alternativa clave en la transición energética, especialmente en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

A pesar del crecimiento evidenciado —tanto en capacidad instalada como en valor de mercado— los datos indican que existe un enorme potencial sin desarrollar, con más del 60% de los recursos aún disponibles. Esto plantea oportunidades significativas para expansión futura, pero también desafíos

#### **4.7 Aspectos técnicos y caso de estudio: MCH Juntas del Tamaná (Nóvita, Chocó - Colombia)**

La Micro Central Hidroeléctrica (MCH) Juntas del Tamaná se localiza en una zona rural de difícil acceso en el municipio de Nóvita, Chocó, donde la ausencia de un suministro eléctrico estable ha impulsado el uso de soluciones de generación distribuida basadas en recursos hídricos. Debido a las condiciones geográficas del corregimiento, la operación y el mantenimiento presencial resultan limitados, lo que motiva la implementación de un sistema de telemetría capaz de monitorear de forma remota variables críticas como caudal, corriente,

relacionados con la inversión, la capacitación técnica y la integración ambiental y social de los proyectos.

El caso europeo demuestra que un desarrollo maduro y sostenido de PCH es posible cuando existe una combinación de políticas estables, tradición tecnológica e infraestructura consolidada. En contraste, África representa un ejemplo de alto potencial subutilizado, marcado por limitaciones económicas, políticas y logísticas que dificultan la materialización de proyectos hidroeléctricos.

voltaje y el estado de la turbina y del generador. Este sistema también permitirá el desarrollo de procesos de investigación científica basados en la adquisición continua de datos y la generación de alertas tempranas ante fenómenos naturales que puedan afectar la disponibilidad del recurso o la estabilidad de la infraestructura.

La MCH cuenta con una capacidad instalada de 10 kW y está compuesta por una turbina Michell-Banki de flujo cruzado diseñada para operar a 720 rpm, un generador bifásico de 10 kVA y 60 Hz (operado mediante poleas para lograr las 1800 rpm requeridas), tubería biaxial de 10” y 160 psi,

una casa de máquinas de 15 m<sup>2</sup>, redes de distribución de baja tensión y las obras civiles necesarias, como la captación, el desarenador y la cámara de carga. El agua es derivada desde la quebrada La Onda, pasa por el sistema de pretratamiento hidráulico y es conducida por una tubería de presión de 304 m hasta la casa de máquinas, donde se aprovecha un desnivel de 18 metros para accionar la turbina y generar energía eléctrica.

Desde una perspectiva conceptual, una micro central hidroeléctrica es una instalación de generación renovable con una capacidad inferior a 100 kW, generalmente diseñada para abastecer comunidades rurales. Sus componentes se clasifican en hidráulicos —captación, desarenador, cámara de carga, tubería de presión y restitución— y electromecánicos —turbina, generador, sistemas de control y redes de distribución—. Para integrar un sistema de monitoreo remoto, se requieren además Sistemas de Adquisición de Datos (SAD), conformados por sensores, módulos de acondicionamiento, convertidores analógico-digitales y unidades de almacenamiento. Estos sistemas pueden ser gestionados mediante microcontroladores y placas de desarrollo como Arduino, destinado a la recolección y transmisión de datos desde sensores, y Raspberry Pi,

utilizada para organizar bases de datos y ejecutar programas que permiten la visualización y el análisis de la información. Los entornos de programación seleccionados para este caso incluyen LabVIEW, por su versatilidad en medición y automatización, y Python como complemento para análisis específicos cuando sea necesario.

El sistema de telemetría propuesto para la MCH Juntas del Tamaná considera la medición de variables físicas esenciales para la operación y el análisis científico: voltaje y corriente AC, caudal promedio, precipitación, humedad relativa y temperatura ambiente. Para ello se emplearán dispositivos específicos según cada variable: sensores resistivos o capacitivos para voltaje, transformadores de corriente y sensores de efecto Hall para corriente, pluviómetros basculantes como el ADCON RG1 para precipitación, transmisores MAXTHERMO para humedad y temperatura, y sistemas ultrasónicos como el EchoMax XPS-10 y el controlador SITRANS LUT400 para nivel y caudal. Para la visualización de los parámetros eléctricos se propone el uso del instrumento SENTRON PAC.

Dado que algunos equipos se ubican en la zona de bocatoma, sin acceso a la red eléctrica de la casa de máquinas, el sistema

contará con un kit fotovoltaico con baterías de respaldo, donde la comunicación entre dispositivos se realizará mediante el protocolo Modbus RTU bajo una estructura maestro–esclavo, mientras que la transmisión remota de datos se garantizará mediante un enrutador 4G.

El diseño teórico del sistema establece que los sensores enviarán señales a los módulos de entrada/salida, que a su vez se conectarán a módulos SERIOT encargados de transmitir los datos hacia la nube (MyCloud). Desde allí, la información será procesada para generar visualizaciones gráficas y alertas vía correo electrónico o SMS. De acuerdo con la propuesta de instalación, los sensores de corriente, voltaje, humedad y precipitación se ubicarán en la casa de máquinas, mientras que el sensor de nivel y el sistema fotovoltaico se instalarán en la bocatoma. Finalmente, se seleccionó LabVIEW como entorno principal de programación por su compatibilidad con los equipos y su capacidad para integrar múltiples señales.

La selección de todos los componentes se basó en criterios de compatibilidad con tecnologías actuales, resistencia a la intemperie, confiabilidad metrológica, facilidad de integración y costos accesibles. En conjunto, el sistema de

telemetría planteado constituye un elemento esencial para garantizar la continuidad operativa de la MCH Juntas del Tamaná, mejorar la eficiencia del sistema, fortalecer la vigilancia del recurso hídrico y generar información valiosa para investigaciones futuras orientadas al aprovechamiento sostenible de las microcentrales hidroeléctricas en zonas rurales del país.

## 5. Conclusión

A través de la revisión integral de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), complementada con el análisis detallado del caso de la Micro Central Hidroeléctrica (MCH) *Juntas del Tamaná*, se concluye que estas tecnologías representan una alternativa estratégica para la transición energética en territorios rurales y de difícil acceso, especialmente cuando se diseñan bajo criterios integrales que articulan eficiencia técnica, sostenibilidad ambiental y participación comunitaria.

Los resultados obtenidos en las seis secciones analizadas muestran que, desde el punto de vista tecnológico, las PCH han avanzado hacia sistemas más eficientes, modulares y adaptables, integrando innovaciones en turbinas, automatización, materiales y diseños hidráulicos. Estas tendencias se reflejan directamente en la

MCH *Juntas del Tamaná*, cuyo diseño compacto —basado en una turbina Michell-Banki, tubería de presión de alta resistencia y un generador adaptado mediante poleas— demuestra la capacidad de las microcentrales para operar de manera confiable con infraestructura optimizada a pequeña escala. De esta manera, el potencial de innovación se amplía con la integración de sistemas de telemetría y monitoreo remoto, cuya implementación en el caso de estudio representa un aporte diferencial frente a proyectos tradicionales, permitiendo controlar variables críticas en tiempo real y superar las barreras de operación asociadas a la ubicación remota.

En el ámbito económico, la literatura evidencia mejoras en la estandarización de equipos, la reducción de costos y el surgimiento de modelos descentralizados que facilitan la adopción de PCH en comunidades rurales. En coherencia con estos hallazgos, la MCH *Juntas del Tamaná* resalta la importancia de considerar criterios como compatibilidad tecnológica, durabilidad y accesibilidad económica en la selección de componentes, especialmente cuando se integran sistemas adicionales como módulos de adquisición de datos, sensores especializados y kits fotovoltaicos para sitios sin acceso a la red. Estos elementos

contribuyen a garantizar un proyecto viable, escalable y sostenible.

En cuanto a los impactos ambientales, la revisión muestra que, aunque las PCH suelen percibirse como de bajo impacto, pueden generar alteraciones significativas en caudales ecológicos, conectividad fluvial y biota, con efectos que dependen fuertemente del tramo del río y de la densidad de instalaciones en la cuenca. En este sentido, el caso *Juntas del Tamaná* se alinea con la evidencia, destacando que las microcentrales —cuando están bien diseñadas, con baja alteración hidráulica y control continuo del recurso— pueden operar con impactos mínimos, ya que la instalación de sensores para nivel, caudal, precipitación y parámetros ambientales en este proyecto permitirá mejorar el entendimiento del comportamiento hídrico y apoyar una gestión adaptativa que contribuya a proteger el ecosistema local.

En materia de modelado y operación, la investigación subraya el valor de herramientas avanzadas para simular el comportamiento hidráulico y energético de las PCH. Además, la propuesta de telemetría del caso de estudio, que integra sistemas de adquisición de datos, protocolo Modbus RTU y transmisión 4G a la nube, representa una aplicación directa de estas tendencias,

posicionando a la MCH como una plataforma para investigación científica y monitoreo continuo. Igualmente, la adopción de LabVIEW y Python responde a la creciente necesidad de entornos flexibles, capaces de manejar bases de datos, ejecutar algoritmos y generar visualizaciones para la toma de decisiones.

Desde el enfoque de políticas y gestión, el estudio reafirma la importancia de regulaciones claras, incentivos adecuados y participación de actores locales. Un ejemplo de ello ocurre en *Juntas del Tamaná* donde se evidencia que la integración comunitaria y el diseño contextualizado son elementos clave para la aceptación y sostenibilidad del proyecto, especialmente en zonas con

históricas limitaciones de acceso a servicios básicos.

Finalmente, la literatura revisada y el caso aplicado demuestran que las PCH —y en particular las microcentrales con sistemas avanzados de monitoreo— no solo constituyen una solución energética robusta para áreas rurales, sino también una herramienta para fortalecer la gestión del recurso hídrico, promover investigación científica y avanzar hacia modelos de desarrollo local más sostenibles. No obstante, para expandir su adopción de manera responsable, es indispensable mejorar los marcos de planificación a escala de cuenca, fortalecer el seguimiento operativo y estandarizar herramientas de evaluación ambiental y socioeconómica.

## 6. Referencias

- Abdullah, Z. T., & Glasscock, J. A. (2025). Quantitative sustainability assessment of a micro-hydropower system: case study of the Mesopotamia sedimentary plain. *Results in Engineering*, 28, 107445. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107445>
- Akorede, M. F. (2022). Design and performance analysis of off-grid hybrid renewable energy systems. In *Hybrid Technologies for Power Generation* (pp. 35–68). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823793-9.00001-2>
- Ali, S., Stewart, R. A., Sahin, O., & Vieira, A. S. (2023). Integrated GIS-AHP-based approach for off-river pumped hydro energy storage site selection. *Applied Energy*, 337, 120914. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120914>
- Allouhi, A. (2024). A hybrid PV/wind/battery energy system to assist a run-of-river micro-hydropower for clean electrification and fuelling hydrogen mobility for young population in a rural Moroccan site. *Journal of Cleaner Production*, 442, 140852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140852>

- Athayde, S., Duarte, C. G., Gallardo, A. L. C. F., Moretto, E. M., Sangoi, L. A., Dibo, A. P. A., Siqueira-Gay, J., & Sánchez, L. E. (2019). Improving policies and instruments to address cumulative impacts of small hydropower in the Amazon. *Energy Policy*, *132*, 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.003>
- Atkins, E. (2020). Contesting the ‘greening’ of hydropower in the Brazilian Amazon. *Political Geography*, *80*, 102179. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2020.102179>
- Azimov, U., & Avezova, N. (2022). Sustainable small-scale hydropower solutions in Central Asian countries for local and cross-border energy/water supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *167*, 112726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112726>
- Bayazit, Y., Bakış, R., & Koç, C. (2017). An investigation of small scale hydropower plants using the geographic information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.062>
- Bekker, A., Van Dijk, M., & Niebuhr, C. M. (2022). A review of low head hydropower at wastewater treatment works and development of an evaluation framework for South Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *159*, 112216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112216>
- Caetano, N. S., Martins, F. F., & Oliveira, G. M. (2024). Life cycle assessment of renewable energy technologies. In *The Renewable Energy-Water-Environment Nexus* (pp. 37–79). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13439-5.00002-8>
- Carrolli, M., Garcia de Leaniz, C., Jones, J., Belletti, B., Huđek, H., Pusch, M., Pandakov, P., Börger, L., & van de Bund, W. (2023). Impacts of existing and planned hydropower dams on river fragmentation in the Balkan Region. *Science of The Total Environment*, *871*, 161940. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161940>
- Carvalho, N. B., Berrêdo Viana, D., Muylaert de Araújo, M. S., Lampreia, J., Gomes, M. S. P., & Freitas, M. A. V. (2020). How likely is Brazil to achieve its NDC commitments in the energy sector? A review on Brazilian low-carbon energy perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *133*, 110343. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110343>
- Chen, J., & Engeda, A. (2020). Standard module hydraulic technology: A novel geometrical design methodology and analysis for a low-head hydraulic turbine system, Part I: General design methodology and basic geometry considerations. *Energy*, *196*, 117151. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117151>
- Costa, A. S., Rocha, A. E. F., Saavedra, O. R., Assireu, A. T., & Pimenta, F. M. (2026). Assessment of tidal current energy resources for electricity generation in the São Marcos estuary - Brazil. *Ocean Engineering*, *343*, 123185. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123185>
- Deveci, M., Cali, U., Kucuksari, S., & Erdogan, N. (2020). Interval type-2 fuzzy sets based multi-criteria decision-making model for offshore wind farm

- development in Ireland. *Energy*, 198, 117317.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117317>
- Duran, A. S., & Sahinyazan, F. G. (2021). An analysis of renewable mini-grid projects for rural electrification. *Socio-Economic Planning Sciences*, 77, 100999.  
<https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100999>
- Đurin, B., Plantak, L., Lajqi, S., & Kranjčić, N. (2022). Insight into the potential of the energy production by hybrid systems: small hydropower and solar photovoltaics. In *Complementarity of Variable Renewable Energy Sources* (pp. 427–438). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85527-3.00017-0>
- Fernandez Vazquez, C. A. A., Mendoza Paz, S., Hannotte, A., Balderrama, S., Crespo del Prado, P., & Quoilin, S. (2026). Integrating climate-driven hydropower variability into long-term energy planning: A Bolivian case study under El Niño and La Niña scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116250.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116250>
- Ferreira, J. H. I., Camacho, J. R., Malagoli, J. A., & Júnior, S. C. G. (2016). Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 380–387.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.035>
- Franco, A., Shaker, M., Kalubi, D., & Hostettler, S. (2017). A review of sustainable energy access and technologies for healthcare facilities in the Global South. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 92–105.  
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.022>
- Gao, H., Qi, X., Lin, Z., Li, M., Liu, G., Lv, Y., Khan, S., & Wu, N. (2025). Impact of small hydropower plants on microbial community structure and functions in benthic biofilms. *Journal of Environmental Management*, 392, 126869.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126869>
- Gasparatos, A., Doll, C. N. H., Esteban, M., Ahmed, A., & Olang, T. A. (2017). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 161–184.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030>
- He, M., Niu, J., Liu, D., Wu, P., & Hu, B. X. (2025). Remote sensing in river obstruction research: A bibliometric analysis integrated with large language model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 62, 102850.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102850>
- Hedger, R. D., Kenawi, M. S., Sundt-Hansen, L. E., Bakken, T. H., & Sandercock, B. K. (2025). Evaluating environmental impacts of micro, mini and small hydropower plants in Norway. *Journal of Environmental Management*, 373, 123521.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123521>
- Idiaghe, L. (2018). Legislation on Hydropower Use and Development. In *Sustainable Hydropower in West Africa* (pp. 159–187). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813016-2.00011-3>

- Kong, Y., Kong, Z., Liu, Z., Wei, C., & An, G. (2016). Substituting small hydropower for fuel: The practice of China and the sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *65*, 978–991. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.056>
- Kumar, K., & Saini, R. P. (2022). Economic analysis of operation and maintenance costs of hydropower plants. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *53*, 102704. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102704>
- Kumar, S., & Madlener, R. (2016). CO2 emission reduction potential assessment using renewable energy in India. *Energy*, *97*, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.131>
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., Bejarano, M. D., & Garrote, L. (2021). Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *142*, 110833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110833>
- Laks, I., Walczak, Z., & Walczak, N. (2023). Fuzzy analytical hierarchy process methods in changing the damming level of a small hydropower plant: Case study of Rosko SHP in Poland. *Water Resources and Industry*, *29*, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100204>
- Li, X., Chen, Z., Fan, X., & Cheng, Z. (2018). Hydropower development situation and prospects in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.090>
- Li, X., Liu, P., Feng, M., Jordaan, S. M., Cheng, L., Ming, B., Chen, J., Xie, K., & Liu, W. (2024). Energy transition paradox: Solar and wind growth can hinder decarbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *192*, 114220. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114220>
- Lin, Z., Zheng, Y., Qi, X., Zheng, Q., Duan, Y., Gao, H., Liu, G., Wang, Y., Shi, J., Khan, S., & Wu, N. (2025). Small hydropower plants alter the assembly mechanisms and environmental drivers of macroinvertebrate communities in different sections. *Global Ecology and Conservation*, *62*, e03718. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2025.e03718>
- Mahmud, M. A. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2019). A strategic impact assessment of hydropower plants in alpine and non-alpine areas of Europe. *Applied Energy*, *250*, 198–214. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.007>
- Ming, Z., Shaojie, O., Hui, S., Yujian, G., & Qiqi, Q. (2015). Overall review of distributed energy development in China: Status quo, barriers and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 1226–1238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.065>
- Mishra, M. K., Khare, N., & Agrawal, A. B. (2015). Small hydro power in India: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *51*, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.075>

- Motahari, S., & Rahimpour, M. R. (2024). Hydro and Wind-Based Cogeneration Technologies. In *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment* (pp. 339–346). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-93940-9.00196-1>
- Mukhopadhyay, A., Hati, J. P., Acharyya, R., Pal, I., Tuladhar, N., & Habel, M. (2025). Global trends in using the InVEST model suite and related research: A systematic review. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 25(2), 389–405. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.06.002>
- Nedaei, A., Aghaei, M., Eskandari, A., Maurer, F., & Cali, U. (2025). Digital twins for hydropower applications. In *Digital Twin Technology for the Energy Sector* (pp. 213–234). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14070-9.00010-X>
- Nguyen, P. A., Abbott, M., & Nguyen, T. L. T. (2019). The development and cost of renewable energy resources in Vietnam. *Utilities Policy*, 57, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.01.009>
- Olivares, M. A., Lillo, R., & Haas, J. (2021). Grid-wide assessment of varying re-regulation storage capacity for hydropeaking mitigation. *Journal of Environmental Management*, 293, 112866. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112866>
- Othman, M. E. F., Sidek, L. M., Basri, H., El-Shafie, A., & Ahmed, A. N. (2025). Climate challenges for sustainable hydropower development and operational resilience: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 209, 115108. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115108>
- Otto, C., Louloudis, G., Roumpos, C., Mertiri, E., Ernst, P., & Kempka, T. (2026). Economic feasibility of Pumped Hydropower Storage in a European open-pit lignite mine. *Energy Conversion and Management*, 347, 120491. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120491>
- Piper, A. T., Rosewarne, P. J., Wright, R. M., & Kemp, P. S. (2018). The impact of an Archimedes screw hydropower turbine on fish migration in a lowland river. *Ecological Engineering*, 118, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.009>
- Punys, P. (2025). Computer-based tools for assessment of small-scale hydropower resources and project feasibility: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 216, 115717. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115717>
- Puschnigg, S., Patauner, D., Böhm, H., Doujak, E., & Müller, C. (2025). Digitalization and hydropower integration in water supply systems: Unlocking energy potential, efficiency, and resilience. *Cleaner Engineering and Technology*, 29, 101098. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101098>
- Qi, X., Lin, Z., Gao, H., Li, M., Duan, Y., Liu, G., Khan, S., Mu, H., Messyas, B., & Wu, N. (2024). Small hydropower plants affect aquatic community diversity: A longitudinal study under ecological flow. *Journal of Environmental Management*, 370, 122987. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122987>

- Raja Abd Jalil, R. F., Chong, K. L., Huang, Y. F., Abdul Malek, M. B., Elkollaly, M., Sherif, M., El-Shafie, A., & Ahmed, A. N. (2026). Advancing climate change impact assessment on global hydropower systems: Methodologies, models, and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116364>
- Safdar, I., Sultan, S., Raza, H. A., Umer, M., & Ali, M. (2020). Empirical analysis of turbine and generator efficiency of a pico hydro system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100605. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100605>
- Sasthav, C., & Oladosu, G. (2022). Environmental design of low-head run-of-river hydropower in the United States: A review of facility design models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112312>
- Scotti, A., & Bottarin, R. (2021). Fine-scale multiannual survey of benthic invertebrates in a glacier-fed stream used for hydropower generation. *Scientific Data*, 8(1), 105. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00887-x>
- Shiji, C., Dhakal, S., & Ou, C. (2021). Greening small hydropower: A brief review. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100676. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100676>
- Singh, V. K., & Singal, S. K. (2017). Operation of hydro power plants-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 610–619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.169>
- Sofi, M. S., Hamid, A., Bhat, S. U., Rashid, I., & Kuniyal, J. C. (2022). Biotic alteration of benthic macroinvertebrate communities based on multispatial-scale environmental variables in a regulated river system of Kashmir Himalaya. *Ecological Engineering*, 177, 106560. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106560>
- Spänhoff, B. (2014). Current status and future prospects of hydropower in Saxony (Germany) compared to trends in Germany, the European Union and the World. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.035>
- Spasenic, Z., Makajic-Nikolic, D., & Benkovic, S. (2022). Risk assessment of financing renewable energy projects: A case study of financing a small hydropower plant project in Serbia. *Energy Reports*, 8, 8437–8450. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.065>
- Suraparaju, S. K., Samykano, M., Vennapusa, J. R., Rajamony, R. K., Balasubramanian, D., Said, Z., & Pandey, A. K. (2025). Challenges and perspectives of energy storage integration in renewable energy systems for net zero transition. *Journal of Energy Storage*, 125, 116923. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116923>
- Tahseen, S., & Karney, B. W. (2017). Reviewing and critiquing published approaches to the sustainability assessment of hydropower. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.031>

- Tazikeh, S., Mohammadzadeh, O., Zendejboudi, S., Saady, N. M. C., Albayati, T. M., & Chatzis, I. (2025). Energy development and management in the Middle East: A holistic analysis. *Energy Conversion and Management*, 323, 119124. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119124>
- Tefera, W. M., & Kasiviswanathan, K. S. (2022). A global-scale hydropower potential assessment and feasibility evaluations. *Water Resources and Economics*, 38, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2022.100198>
- Teffera, B., Assefa, B., & Assefa, G. (2020). Assessing the life cycle environmental impacts of hydroelectric generation in Ethiopia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 41, 100795. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100795>
- Tiwari, G., Kumar, J., Prasad, V., & Patel, V. K. (2020). Utility of CFD in the design and performance analysis of hydraulic turbines — A review. *Energy Reports*, 6, 2410–2429. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.004>
- Ugwu, C. O., Ozor, P. A., & Mbohwa, C. (2022). Small hydropower as a source of clean and local energy in Nigeria: Prospects and challenges. *Fuel Communications*, 10, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100046>
- Uniyal, V., Karn, A., & Singh, V. P. (2025). Comparative life cycle assessment of micro water Turbines: Evaluating potential for remote power generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 73, 104107. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104107>
- Virah-Sawmy, D., & Sturmberg, B. (2025). Socio-economic and environmental impacts of renewable energy deployments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114956>
- Wang, D., Wang, X., Huang, Y., Zhang, X., Zhang, W., Xin, Y., Qu, M., & Cao, Z. (2021). Impact analysis of small hydropower construction on river connectivity on the upper reaches of the great rivers in the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01496. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01496>
- Xu, J., & Ni, T. (2017). Integrated technological paradigm-based soft paths towards sustainable development of small hydropower. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 623–634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.021>
- Yah, N. F., Oumer, A. N., & Idris, M. S. (2017). Small scale hydro-power as a source of renewable energy in Malaysia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.068>
- Yu, B., & Xu, L. (2016). Review of ecological compensation in hydropower development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 729–738. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.038>

- Yu, B., Xu, L., & Yang, Z. (2016). Ecological compensation for inundated habitats in hydropower developments based on carbon stock balance. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 334–342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.071>
- Zahedi, R., Ahmadi, A., & Gitifar, S. (2022). Reduction of the environmental impacts of the hydropower plant by microalgae cultivation and biodiesel production. *Journal of Environmental Management*, *304*, 114247. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114247>
- Zhang, C., Chen, S., Qiao, H., Dong, L., Huang, Z., & Ou, C. (2020). Small hydropower sustainability evaluation for the countries along the Belt and Road. *Environmental Development*, *34*, 100528. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100528>
- Zhou, Y., Chang, L.-C., Uen, T.-S., Guo, S., Xu, C.-Y., & Chang, F.-J. (2019). Prospect for small-hydropower installation settled upon optimal water allocation: An action to stimulate synergies of water-food-energy nexus. *Applied Energy*, *238*, 668–682. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.069>