

(05-002) - Exploring the Future of Energy through Hydro-Photovoltaic Hybridization

Fernández-Guillamón, Ana ¹

¹ Universidad de Castilla La Mancha

The energy transition to renewable energy sources is essential to address today's environmental and climate challenges. In this context, hybrid systems emerge as a crucial solution to optimize energy generation in an efficient and sustainable manner. The combination of various renewable sources not only diversifies the energy matrix, but also maximizes the resilience and stability of power systems. In particular, the hybridization of hydropower and photovoltaics represents a significant step towards a brighter energy future. By combining hydropower (an energy source that is widely developed and has the advantage of being grid-connected through synchronous generators) with the versatility and accessibility of photovoltaics, a robust system is achieved. This hybrid system can address the inherent limitations of each source in a complementary manner. This approach not only optimizes energy production, but also allows for greater flexibility and adaptability to variations in climate and demand, demonstrating the critical role this synergy plays in accelerating the transition to a more sustainable and resilient energy future.

Keywords: energy transition; hybrid systems; renewable energy sources; hydropower; photovoltaics

Explorando el Futuro de la Energía a través de la Hibridación Hidro-Fotovoltaica

La transición energética hacia fuentes renovables es esencial para abordar los desafíos ambientales y climáticos actuales. En este contexto, los sistemas híbridos emergen como una solución crucial para optimizar la generación de energía de manera eficiente y sostenible. La combinación de diversas fuentes renovables no solo diversifica la matriz energética, sino que también maximiza la resiliencia y la estabilidad de los sistemas eléctricos. En particular, la hibridación de energía hidroeléctrica y fotovoltaica representa un paso significativo hacia un futuro energético más prometedor. Al unir la energía hidroeléctrica (fuente energética ampliamente desarrollada y que presenta la ventaja de ir conectada a la red mediante generadores síncronos) con la versatilidad y accesibilidad de la solar fotovoltaica, se logra un sistema robusto que aborda las limitaciones inherentes de cada fuente de manera complementaria. Este enfoque no solo optimiza la producción de energía, sino que también permite una mayor flexibilidad y adaptabilidad a las variaciones climáticas y de demanda, mostrando el papel fundamental que desempeña esta sinergia en la aceleración de la transición hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

Palabras clave: transición energética; sistemas híbridos; energías renovables; hidráulica; fotovoltaica

Correspondencia: ana.fguillamon@uclm.es

Agradecimientos: Ministerio de Ciencia e Innovación, España (Ref. PID2021-126082OB-C22).



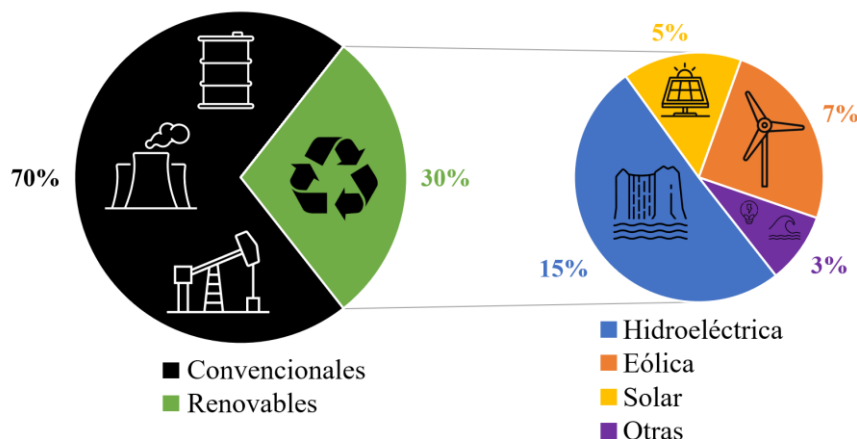
©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción y objetivos

En la actualidad, la humanidad se enfrenta a uno de los desafíos más críticos de su historia: el cambio climático. Resultado de décadas de actividad humana impulsada por la quema desmedida de combustibles fósiles, el cambio climático ha adquirido proporciones alarmantes. Las consecuencias, palpables en fenómenos climáticos extremos, alteraciones en los ecosistemas, acidificación de los océanos y la pérdida acelerada de biodiversidad (entre otras), son recordatorios inequívocos de la necesidad apremiante de adoptar prácticas más sostenibles, exigiendo una respuesta inmediata a nivel global (Weiskopf et al., 2020). El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de fuentes de energía convencionales plantean desafíos significativos para la humanidad (Paraschiv y Paraschiv, 2020). Por ello, es necesario replantear nuestra relación con la energía y conseguir una matriz más sostenible (Gil-García et al., 2024). En este contexto, la transición hacia fuentes de energía renovable se presenta como una respuesta fundamental, constituyendo un pilar esencial en la lucha contra el cambio climático para conseguir un futuro donde la dependencia de combustibles fósiles se disuelva gradualmente (Mufutau Opeyemi, 2021).

Las energías renovables no solo ofrecen una alternativa más limpia a los combustibles fósiles, sino que también se caracterizan por tener un potencial inagotable al renovarse constantemente, por lo que no desaparecen al emplear su energía útil (Halkos y Gkampoura, 2020). Dentro de las energías renovables, que suponen el 30% de la generación eléctrica a nivel mundial, destacan las energías hidráulica, solar y eólica, representando un 90% de esa generación eléctrica renovable a nivel mundial (un 27% del total de generación), como se muestra en la Figura 1 (datos obtenidos de Share of Electricity Production by Source, World, 2023).

Figura 1: Generación de electricidad por fuentes a nivel mundial en el año 2022



La energía hidráulica, en la práctica, se obtiene a partir del movimiento de agua, como el flujo de un río o la corriente entre dos pantanos con diferentes alturas. Las centrales hidroeléctricas utilizan esta energía mediante turbinas hidráulicas para convertirla en energía mecánica, que luego se convierte en electricidad mediante un generador síncrono. Cuentan con la ventaja de ser útiles para ajustar la producción a las necesidades de la demanda gracias a su fácil conexión y desconexión (Carta González et al., 2013). La energía eólica aprovecha la energía cinética del aire en movimiento. Los parques eólicos aprovechan esta energía para hacer girar una turbina eólica (aerogenerador) para convertir esta energía en eléctrica, con generadores asíncronos, cuyo funcionamiento se adapta mejor a las condiciones cambiantes del viento y cuyo coste es más económico (Cuco Pardillos, 2017). La energía solar proviene del Sol en

forma de radiación, que es producto de la energía nuclear interna del Sol, que se transforma en radiación solar mediante procesos de fusión. Esta energía puede aprovecharse en forma de solar térmica y como solar FV (FV), siendo ésta última la más desarrollada para generar electricidad (Ahmad et al., 2020). Las centrales FV constan de paneles de células FV que convierten la radiación solar en corriente continua mediante el efecto FV. Luego, esta corriente continua se convierte en corriente alterna a través de un inversor y se inyecta a la red (Abella, 2005).

Desde el punto de vista de la operación del sistema eléctrico, tanto las centrales eólicas como las centrales FV tienen una característica común: su producción está supeditada a la disponibilidad instantánea de energía primaria (viento y radiación solar, respectivamente), lo que dificulta enormemente el control sobre la energía que generan y, por tanto, no pueden ser utilizadas para seguir las fluctuaciones de la demanda (Fernández-Guillamón et al., 2019). Por ello, los sistemas renovables híbridos, donde se combinan diferentes fuentes de energía renovable (con o sin almacenamiento), han aparecido como una solución a este problema, incluyendo principalmente combinaciones como eólica-FV, eólica-almacenamiento, FV-almacenamiento, eólica-FV-almacenamiento, hidroeléctrica-FV, hidroeléctrica-eólica e hidroeléctrica-FV-eólica (Lian et al., 2019). Estos sistemas híbridos garantizan un suministro constante de energía incluso en condiciones variables, por lo que ofrecen una mayor fiabilidad en comparación con las fuentes de energía individuales, especialmente para sistemas aislados. Además, permiten aprovechar lo mejor de cada tecnología, logrando mayor eficiencia, menores costes operativos, un uso más flexible de los recursos energéticos, y pueden adaptarse a diversas necesidades y contextos, desde entornos urbanos hasta áreas remotas (Sohail et al., 2022). En un contexto global centrado en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, los sistemas híbridos renovables se posicionan como una alternativa prometedora, proporcionando soluciones flexibles y eficientes para satisfacer la creciente demanda de energía de manera respetuosa con el medio ambiente (Vivas et al., 2018).

En la actualidad, existen numerosos casos de éxito de sistemas híbridos, como la isla de Ta'u (Samoa Americana), con un sistema eléctrico híbrido compuesto por 1.4 MW de capacidad FV con 6 MWh de baterías; dos islas de Australia (Isla de King e Isla de Rottneest), que utilizan sistemas híbridos eólico-FV, combinadas con tecnologías de apoyo y almacenamiento (baterías, volantes de inercia, generadores diésel); la isla de Eigg (Escocia) tiene un sistema híbrido formado por tres generadores hidroeléctricos (de 100, 6 y 5 kW), cuatro aerogeneradores (de 6 kW cada uno) y una instalación FV (de 170 kW), consiguiendo suministrar el 95% de la electricidad (el 5% restante lo generan dos generadores diésel de 64 kW, que sirven de respaldo cuando escasean las fuentes renovables o durante las tareas de mantenimiento); o la central hidro-eólica de Gorona del Viento (El Hierro, España), formada por 11.3 MW hidroeléctricos y 11.5 MW eólicos, capaz de abastecer 1008 horas con energía 100% renovable en 2022.

Como ya se ha comentado, la ventaja de las centrales hidroeléctricas radica en su facilidad para ajustar su producción. Al incorporarlas en sistemas híbridos, se puede garantizar una generación de constante y flexible, actuando como respaldo durante periodos de menor producción solar o eólica, evitando el uso de sistemas adicionales de almacenamiento (Tan et al., 2021). En este sentido, este trabajo se centra en una revisión bibliográfica sobre estudios enfocados en la hibridación hidro-solar de los últimos años (2020-2024), de manera que se comprenda el estado actual de la investigación y las aplicaciones prácticas, dado que este tipo de sistema está relativamente poco desarrollado en la actualidad. Así, se pretende comprender el estado actual de la investigación, identificar tendencias, y obtener conocimientos clave sobre la eficiencia, desafíos y oportunidades en la integración de estos sistemas híbridos para futuros proyectos energéticos. Además, recientemente, Iberdrola ha obtenido el permiso ambiental para construir la primera instalación híbrida de este tipo en

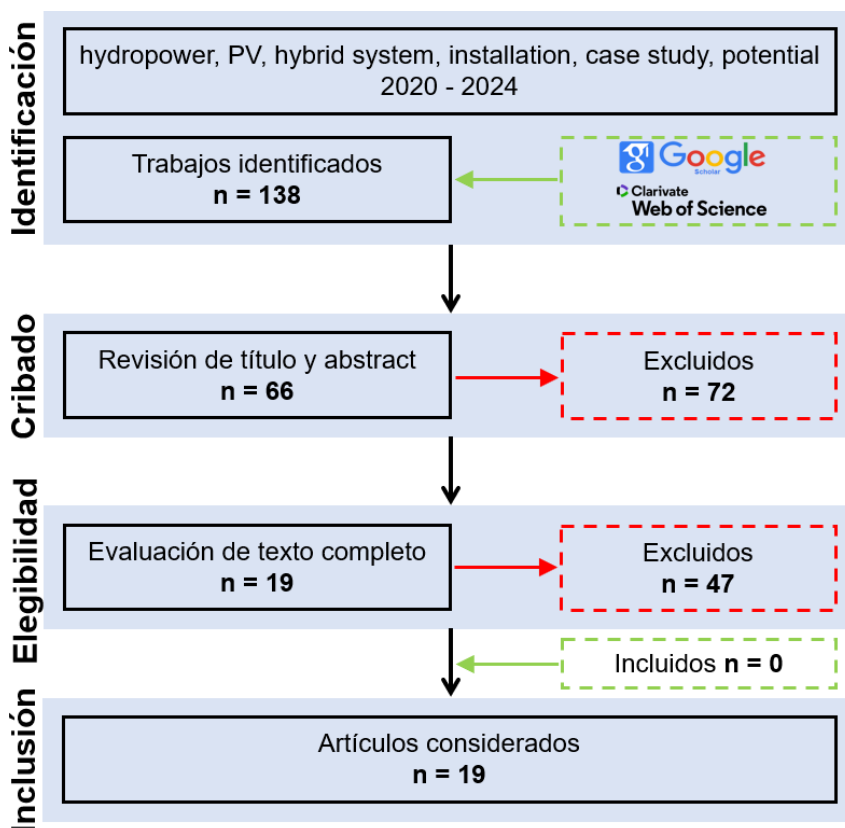
nuestro país, lo que pone de manifiesto la importancia de estos sistemas para facilitar una producción renovable más estable y eficiente (*Iberdrola España obtiene el permiso ambiental para la primera instalación híbrida hidroeléctrica con solar del país en Cedillo (Cáceres)*, s. f.)

El resto del estudio se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la metodología utilizada para realizar la revisión bibliográfica; la Sección 3 presenta los resultados obtenidos y, finalmente, las conclusiones del estudio se incluyen en la Sección 4.

2. Metodología

La metodología utilizada para realizar esta revisión bibliográfica es PRISMA, *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*, utilizado en recientes revisiones bibliográficas en diversos ámbitos de estudio. PRISMA es una metodología que se remonta a principios del siglo XXI, cuando se reconoció la necesidad de mejorar la calidad y transparencia de las revisiones sistemáticas y los meta-análisis, por lo que proporciona un marco estructurado en el proceso de revisión bibliográfica, garantizando la calidad del proceso de búsqueda de trabajos científicos y la selección de los mismos (Sarkis-Onofre et al., 2021). En el campo de la energía, se ha utilizado recientemente por Mardani et al. (2017) para aplicaciones de la toma de decisiones multicriterio para resolver problemas de gestión energética; Gil-García et al. (2021), analizando estrategias de repotenciación eólica; y Cortese et al. (2022) para el uso de energía sostenible en ciudades inteligentes. En la Figura 2 se resume la metodología propuesta.

Figura 2: Aplicación de la metodología PRISMA



La revisión bibliográfica con PRISMA pretende ofrecer un análisis detallado de los trabajos relacionados con los sistemas híbridos basados en hidráulica y solar FV. Las publicaciones buscadas se encuentran en el período de los últimos 5 años (2020-2024), para ver los estudios

más actuales relacionados con esta temática. En la revisión sistemática se pueden identificar cuatro etapas:

1. **Identificación:** Considerando las palabras clave que definen el objetivo general de este trabajo (“hydropower”, “pv”, “hybrid system”, “installation”, “case study”, “potential”) y utilizando las bases de datos Google Scholar y Web of Science, se seleccionaron inicialmente 138 estudios para su posible revisión, todos ellos entre los años 2020-2024.
2. **Cribado:** Analizando el título y resumen (*abstract*) de cada trabajo, se identificaron 72 contribuciones no relacionadas directamente con sistemas híbridos, quedando así 66 publicaciones para ser revisadas.
3. **Elegibilidad:** Tras revisar el texto completo de cada trabajo, se descartaron aquellos estudios que, aunque hablasen de sistemas híbridos, no se enfocaban específicamente en sistemas hidro-FV. En este proceso se descartaron 47 artículos, quedando 19 estudios para analizar.
4. **Inclusión:** En este caso, no se incluyó ningún trabajo adicional a partir de las referencias de los estudios analizados en la fase 3. Por tanto, se tiene un total de 19 contribuciones a analizar para el presente estudio.

3. Resultados

En la Tabla 1 se muestra un primer resumen sobre estas contribuciones. Como se puede comprobar, se han agrupado estos 20 artículos en 4 categorías en función de la temática principal tratada:

1. Viabilidad.
2. Hibridación con FV flotante.
3. Evaluación ambiental.

Tabla 1: Resumen de los artículos revisados

Referencia	Caso de estudio	Resultados principales	Categoría
Fofang y Tanyi (2020)	Comunidad rural en Muyuka (Camerún)	Configuración óptima de 2 MW hidráulicos, 1800 kW FV y 16 baterías de 1 MWh	Viabilidad
Lee et al. (2020)	-	Potencial técnico entre 3000-7600 GW, generando entre 4251-10616 TWh/año	Hibridación FV flotante
Syahputra y Soesanti (2020)	Java Central (Indonesia)	Es suficiente con 555 kW de hidroeléctrica	Viabilidad
Fadhil et al. (2021)	100 farolas LED de una carretera en Al-Bakur (Libia)	Viable y 100% de suministro incluyendo almacenamiento	Viabilidad
Merida García et al. (2021)	Distrito de riego del río Genil (España)	Menor impacto que el diésel, excepto en metales y minerales (baterías y componentes electrónicos)	Evaluación ambiental
Shafiullah et al. (2021)	Chipendeke (Zimbabue)	Necesario combinar con diésel (hidro-FV-diésel-baterías)	Viabilidad

Syahputra y Soesanti (2021)	Yogyakarta (Indonesia)	Es suficiente con 622 kW de hidroeléctrica	Viabilidad
Dusenge et al. (2022)	Baziro (Ruanda)	La simulación muestra que el sistema es viable técnicamente	Viabilidad
Gadzanku et al. (2022)	-	La hibridación reduce el vertimiento solar y optimiza el uso estacional del agua	Hibridación FV flotante
Piancó et al. (2022)	Santa Branca (Brasil)	Diseño preliminar simulado, se duplica la generación	Hibridación FV flotante
Zhang et al. (2022)	-	El tamaño de la FV depende de la estructura del consumo eléctrico	Viabilidad
Bhimaraju et al. (2023)	Telangana (India)	Viable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental	Viabilidad
Tuna y Aytac (2023)	Turquía	Simulación de operación híbrida, aumento del 20% de generación	Viabilidad
Zhang et al. (2023)	Qinghai (China)	Diseño multiobjetivo para reducir al máximo las emisiones de CO ₂ y los cortes de FV	Viabilidad
Olkkonen et al. (2023)	África subsahariana	Aunque los resultados son favorables, un sistema híbrido con seguidor es más atractivo que el flotante desde el punto de vista económico	Hibridación FV flotante
Feio et al. (2024)	Isla Trindade (Brasil)	La FV con sistema de almacenamiento hidráulico inverso es inviable principalmente por motivos ambientales.	Viabilidad
Feyissa et al. (2024)	Goda Warke (Etiopía)	Los sistemas óptimos incluyen hidroeléctrica-FV-baterías, con y sin generación diésel	Viabilidad
Iweh et al. (2024)	Munkep (Camerún)	Configuración óptima de 3 kW FV, batería de 334.89 Ah e hidroeléctrica de 32.2 kW, con un LCOE de 0.0344 \$/kWh	Viabilidad
Jurasz et al. (2024)	Basado en Polonia	Se debe dimensionar cuidadosamente la capacidad FV y comprender bien los	Viabilidad

3.2 Viabilidad

La mayoría de los estudios considerados analizan la viabilidad de estas instalaciones en contextos diversos.

Fofang y Tanyi (2020) se enfocaron en el diseño y simulación de un sistema híbrido óptimo para electrificar una comunidad rural en Muyuka (Camerún) y evaluar su rendimiento mediante el software HOMER. Los resultados indican que la configuración óptima es una central mini-hidráulica de 2 MW, un sistema FV de 1.800 kW y 16 baterías de 1 MWh, con un coste de energía de 0,628\$/kWh. Este sistema híbrido puede suministrar energía de forma confiable y sostenible a la comunidad rural analizada. Dusenge et al. (2022) realizaron un estudio similar para la comunidad rural remota de Baziro (Ruanda), que no tiene acceso a la red eléctrica. Tras evaluar el recurso hídrico y solar, y la demanda eléctrica de la comunidad, se diseñó y simuló un sistema con 15 kW de microhidroeléctrica y 5 kW de solar FV con baterías. Este sistema híbrido puede proveer 135,95 kWh/día que cubren la demanda actual de la comunidad, siendo por tanto técnicamente viable para alimentar a esta comunidad.

Fadhil et al. (2021) analizaron la viabilidad de este sistema híbrido junto con baterías para iluminar una carretera rural de Al-Bakur (Libia), que consta de 100 farolas LED, y analizar si es más económico instalar el sistema híbrido o extender la red eléctrica. Tras analizar el potencial hídrico de un embalse y los datos meteorológicos de irradiación, se realizó el modelado y análisis del sistema híbrido, obteniendo que el sistema óptimo consiste en 30 kW de paneles FV, 0,942 kW de microhidroeléctrica y 103 kWh de almacenamiento; con estas características, el sistema híbrido suministraría el 100% del consumo de las farolas, lo que permitiría ahorrar casi 850 barriles de petróleo. Además, afirman que el coste de su implementación (estimado en 1.168.000 dinares libios, equivalente a 817.600\$) es mucho menor que el coste tradicional de tender líneas y conexiones (estimado en 22.000 \$/km), dado que el terreno es montañoso y accidentado.

Zhang et al. (2022) abordaron la viabilidad y optimización de estos sistemas para alimentar a una ciudad de 60 MW desconectada de la red. El objetivo era determinar el tamaño óptimo de la FV según la estructura de demanda, minimizando el coste actual neto y considerando la hidroeléctrica como fuente complementaria. Aunque no establecieron el tamaño óptimo para la FV, sí destacaron que ésta depende de la estructura del consumo eléctrico (cuanto menor es el consumo del sector industrial, menor el coste económico de la FV, ya que la curva de demanda es más parecida a la curva de generación FV: más baja por la noche y más alta durante el día) y del mes de mayor demanda. En cualquier caso, concluyeron que el sistema híbrido es viable técnica y económicamente, estableciendo el coste crítico de la FV en 920 \$/kW cuando el precio de la generación hidroeléctrica es de 5¢/kWh.

Bhimaraju et al. (2023) estudiaron la viabilidad técnica, económica y ambiental de este sistema híbrido, conectado a la red, incluyendo bombeo hidráulico; para ello, se propuso utilizar una mina de carbón a cielo abierto como embalse inferior y el río Godavari como embalse superior (Telangana, India). Se desarrolló un modelo matemático del sistema y se optimizó el dimensionamiento con el algoritmo mejorado de reducción del espacio de búsqueda, minimizando el coste nivelado de energía (LCOE). Se obtuvo que el sistema óptimo tiene 49,12 MW de FV, turbina de 4643 kW y bomba de 6842 kW, logrando un LCOE de 0,2693 \$/kWh y reduciendo emisiones de CO₂ en 76.99*10⁹ kg.

Tuna y Aytac (2023) querían determinar la viabilidad técnica y económica sobre la hibridación de una central hidroeléctrica operativa en Turquía con una planta FV bajo las condiciones del mercado turco. Tras analizar el potencial solar y modelar la producción de energía de la central hidroeléctrica existente (11 MW) y la FV a instalar (970 kW), se simuló la operación híbrida

para un periodo de 20 años, maximizando el uso de la infraestructura existente, y se evaluó el aumento en la producción de energía total. Los resultados mostraron que la planta solar añadiría 8 GWh anuales (a los 40 GWh generados por la hidroeléctrica), aumentando la generación total un 20%, con una inversión de 2,5 millones de dólares que se recuperaría en 4 años, tras los cuales el beneficio anual del sistema híbrido se incrementaría 20% con respecto a la central hidroeléctrica individual.

Iweh et al. (2024) presentaron un sistema híbrido incluyendo baterías para la comunidad rural de Munkep (Camerún). La viabilidad de electrificar esta comunidad remota se realizó con el software HOMER, con el objetivo de reducir el coste actual neto (y, por tanto, el LCOE) y se validó mediante un algoritmo genético programado en MATLAB. Tras analizar el consumo de la comunidad (consumo energético diario de 431,32 kWh/día y demanda eléctrica máxima de 38,49 kW), la simulación con HOMER dio como sistema óptimo la combinación de 3 kW de FV, dos baterías de 260 Ah y 32,2 kW de hidroeléctrica para cubrir la carga, con un LCOE de 0,0453 \$/kWh. Sin embargo, al validarlo con el algoritmo genético, se obtuvo un sistema de 3 kW de FV y 34,56 kW de hidroeléctrica, sin baterías, y con un LCOE inferior (0.0344 \$/kWh). Por tanto, los autores concluyeron que no existe una solución óptima general para los sistemas híbridos debido a las múltiples restricciones, siendo necesario analizar en profundidad el perfil de consumo del cliente.

Jurasz et al. (2024) investigaron el potencial de combinar plantas FV con pequeñas centrales hidroeléctricas de agua fluyente, aprovechando la infraestructura de conexión a la red eléctrica existente de las centrales hidroeléctricas para también transmitir la electricidad generada por la FV; tomaron datos hidrológicos y meteorológicos de Polonia, aunque no se enfocaron en un caso específico. Querían analizar la energía FV “desaprovechada” debido a superar la transmisión eléctrica existente. Los resultados mostraron que, cuando las capacidades de ambos tipos de centrales son iguales, el 10,7% de la FV tiene que ser “recortada” debido a que la generación global excede la capacidad de transmisión existente; sin embargo, destacaron que combinar las energías FV e hidroeléctrica reduce significativamente los periodos en que hay “sequías energéticas” (no hay generación de ninguna de las dos fuentes), reduciéndose del 3,83% de las horas del año cuando operan por separado, al 1,57% al combinarlas. En cualquier caso, concluyeron que se debe dimensionar cuidadosamente la capacidad FV y comprender bien los patrones de caudal para evitar recortes excesivos.

Por todo lo mencionado *ut supra*, la hibridación hidro-solar es técnica y económicamente viable para diferentes aplicaciones y situaciones. Sin embargo, en otros estudios la solución óptima incluye también la hibridación con generadores diésel (como en el trabajo desarrollado por Shafiullah et al. (2021) en la comunidad rural de Chipendeke (Zimbabue), donde la solución óptima era un sistema híbrido de hidro-FV-diésel-baterías; y en el estudio de Feyissa et al. (2024) en la aldea de Goda Warke (Etiopía), donde este sistema era más económico si el precio del diésel se mantenía hasta 0,8 \$/kWh) o basta únicamente con la hidroeléctrica (como en los estudios realizados por Syahputra y Soesanti (2020, 2021), para las áreas de Java Central (Indonesia) y Yogyakarta (Indonesia), donde se concluyó que los sistemas óptimos estaban formados únicamente por 555 kW y 622 kW de hidroeléctrica, respectivamente, capaces de generar 1.182.600 kWh/año y 5.458.713 kWh/año); en algunos casos, incluso ha llegado a aparecer como una opción no viable frente a otras como eólica + diésel, eólica + hidroeléctrica o FV + baterías (Feio et al., 2024). Por ello, es necesario analizar varias alternativas en cada caso para asegurarse de elegir la óptima desde un punto de vista multicriterio (técnico, económico, ambiental, etc.), como se propone en Zhang et al. (2023).

3.3 Hibridación con FV Flotante

Este grupo engloba aquellos estudios enfocados en los sistemas híbridos hidro-FV flotantes, en los cuales los paneles FV flotan sobre masas de agua como lagos, embalses o estanques.

Lee et al. (2020) exploró en primer lugar los beneficios que pueden ofrecer estos sistemas híbridos, destacando que la complementariedad entre ambas centrales ocurre de manera estacional y diaria, y la FV ayuda a disminuir la evaporación en los embalses. Asimismo, también estimaron el potencial técnico a nivel mundial, que podría situarse entre 3000 y 7600 GW, generando entre 4251 y 10616 TWh/año (entre un 15 y un 37% del consumo mundial en 2022). Sin embargo, es necesario solventar algunos retos, como costes de capital, materiales y operación, impactos ambientales, y temas regulatorios para masificar estos sistemas.

Gadzanku et al. (2022) compararon un sistema FV flotante independiente (ubicado en el mismo embalse de la central hidroeléctrica pero no hibridado con ésta) y la misma instalación FV pero sí hibridada con la central hidroeléctrica, compartiendo la misma interconexión a la red. Simulando los escenarios mediante el modelo Engage (modelo de planificación energética disponible públicamente, flexible y basado en la web para la exploración rápida de escenarios multisectoriales) y comparando ambos sistemas, la hibridación redujo el vertimiento solar causado por restricciones de transmisión y optimizó el uso estacional del agua (desplazando la generación hidroeléctrica de la época húmeda para conservar agua para la época seca), lo que podría ser una medida importante de resiliencia en países vulnerables a sequías.

Piancó et al. (2022) hicieron un diseño preliminar de un sistema híbrido entre una planta hidroeléctrica existente en Santa Branca (Brasil), y una planta FV flotante simulada, que ocupaba el 2,8% de la superficie del embalse (79 MWp). La metodología propuesta consistió en inyectar la potencia máxima de la FV al sistema durante el día, y que la planta hidroeléctrica ajustara su producción sin violar las restricciones operacionales del embalse. En el período analizado (20 años de datos históricos de la hidroeléctrica), ésta generó alrededor de 4 TWh, y la simulación de la FV demostró que podría generar 2 TWh adicionales sin reducir significativamente la generación hidroeléctrica: durante el día, se almacenaría agua en el embalse, y se usaría durante la noche para la generación eléctrica (funcionando la hidroeléctrica como una “batería”). Por tanto, se produciría un aumento del 50% en la producción, usando menos del 3% de la superficie del embalse.

A conclusiones similares a los estudios anteriores llegaron Olkkonen et al. (2023), que examinaron la viabilidad técnica y económica de esos sistemas híbridos flotantes en África subsahariana. Este estudio se centró en cómo la operación bajo diferentes esquemas de contrato y precios de energía afecta a estos sistemas. Además de obtener que el sistema híbrido mejora su operación tanto en el corto plazo (la hidroeléctrica compensa variabilidad diaria de la FV) como en el medio/largo plazo (la FV compensa variaciones estacionales e interanuales de la hidroeléctrica), encontraron que la hibridación con sistemas solares flotantes puede aumentar las ganancias anuales entre un 18-21% en contratos de compra (donde se establecen condiciones para la compra y venta de energía eléctrica generada por una instalación específica y proporciona estabilidad tanto al generador como al comprador al establecer tarifas fijas o mecanismos de ajuste a lo largo del tiempo) y hasta un 4% en el mercado eléctrico, en comparación con sistemas hidroeléctricos independientes. Sin embargo, bajo las condiciones simuladas, un sistema hidro-FV con seguidor a un eje es más atractiva económicamente, puesto que, para tener la misma ganancia, el CAPEX de la FV flotante debería reducirse 52-57% respecto a la FV con seguidor.

3.4 Evaluación Ambiental

Merida García et al. (2021) se enfocaron en evaluar desde el punto de vista ambiental el ciclo de vida de un sistema híbrido microhidro-FV frente al uso de un generador diésel, para alimentar una granja del sur de España. Se consideraron las etapas de manufactura, transporte, instalación y operación de ambos sistemas energéticos, evaluando cuatro categorías de impacto: cambio climático, combustibles fósiles, metales y minerales, y agua disipada. El sistema híbrido tuvo menores impactos que el diésel en todas las categorías

excepto en metales y minerales, debido a las baterías y componentes electrónicos. Cabe destacar que, debido a la estacionalidad de la demanda, solo se consume el 2.2% del potencial total de producción del sistema híbrido, por lo que se podría electrificar otras demandas (como transporte y equipamiento), lo que conseguiría reducir los impactos hasta 45 veces.

4. Conclusiones

Abordar el cambio climático adoptando prácticas energéticas más sostenibles es una necesidad crítica en la actualidad. Las energías renovables, como la hidráulica, solar y eólica, ofrecen alternativas limpias y, aunque las energías eólica y solar presentan desafíos en su disponibilidad instantánea, los sistemas híbridos emergen como soluciones eficientes, especialmente si incorporan centrales hidroeléctricas, que ofrecen una producción constante y flexible al actuar como respaldo durante periodos de menor generación eólica/solar. Las conclusiones de esta revisión bibliográfica sobre la hibridación hidro-solar destacan que la combinación de energía hidráulica y solar FV se presenta como una solución viable y prometedora para la generación de energía renovable. La viabilidad técnica y económica de estos sistemas ha sido demostrada en diversos contextos y aplicaciones, desde la electrificación de comunidades rurales hasta el uso en áreas urbanas y aplicaciones específicas. Los estudios analizados han mostrado que estos sistemas híbridos pueden proporcionar un suministro de energía más estable y eficiente, aprovechando la capacidad de ajuste de las centrales hidroeléctricas y su complementariedad con la energía solar. Además, la hibridación con FV flotante ofrece beneficios adicionales, como la reducción de la evaporación en embalses y un uso más óptimo de la infraestructura existente. Sin embargo, la implementación de estos sistemas enfrenta desafíos relacionados con el coste de capital, la integración tecnológica y los impactos ambientales, lo que requiere un análisis multicriterio para asegurar soluciones óptimas en cada caso. En definitiva, los sistemas híbridos hidro-solares representan una alternativa clave en la transición hacia un futuro energético más sostenible, proporcionando soluciones flexibles y eficientes para satisfacer la creciente demanda de energía de manera respetuosa con el medio ambiente.

5. Bibliografía

- Abella, M. A. (2005). *Sistemas fotovoltaicos*. SAPT Publicaciones Técnicas, SL.
- Ahmad, L., Khordehghah, N., Malinauskaite, J., y Jouhara, H. (2020). Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies. *Energy*, 207, 118254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118254>
- Bhimaraju, A., Mahesh, A., y Nirbheram, J. S. (2023). Feasibility study of solar photovoltaic/grid-connected hybrid renewable energy system with pumped storage hydropower system using abandoned open cast coal mine: A case study in India. *Journal of Energy Storage*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108206>
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., Castro Gil, M.-A., y Collado Fernández, E. (2013). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. Pearson Educación.
- Cortese, T. T. P., Almeida, J. F. S. de, Batista, G. Q., Storopoli, J. E., Liu, A., y Yigitcanlar, T. (2022). Understanding Sustainable Energy in the Context of Smart Cities: A PRISMA Review. *Energies*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072382>
- Cuco Pardillos, S. (2017). *Manual de energía eólica. Desarrollo de proyectos e instalaciones*. Editorial Universitat Politècnica de València.

- Dusenge, P., Niyonsaba, J. D. A., De Dieu Samvura, J., Bikorimana, J., Rwahama, T., y Mudaheranwa, E. (2022). Feasibility study of hybrid Hydro-PV power plant possible deployment in remote rural area. *2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2022*. <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica53997.2022.9905275>
- Fadhil, N. A., Elmnifi, M., Abdulrazig, O. D. H., y Habeeb, L. J. (2021). Design and modeling of hybrid photovoltaic micro-hydro power for Al-Bakur road lighting: A case study. *Materials Today: Proceedings*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.072>
- Feio, A. D., da Silva, F. C., Teixeira, M. A., Lopes Maria, A. C., y da Silva, G. B. S. (2024). Viability of renewable energy integration in isolated systems in Brazil – A case study at Trindade Island (Espírito Santo, Brazil). *Renewable Energy*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119805>
- Fernández-Guillamón, A., Gómez-Lázaro, E., Muljadi, E., y Molina-García, Á. (2019). Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109369. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
- Feyissa, E. A., Tibba, G. S., Binchebo, T. L., Bekele, E. A., y Kole, A. T. (2024). Energy potential assessment and techno-economic analysis of micro hydro-photovoltaic hybrid system in Goda Warke village, Ethiopia. *Clean Energy*, 8(1). <https://doi.org/10.1093/ce/zkad080>
- Fofang, T. F., y Tanyi, E. (2020). Design and Simulation of Off-Grid Solar/Mini-Hydro Renewable Energy System using Homer Pro Software: Case of Muyuka Rural Community. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(9).
- Gadzanku, S., Lee, N., y Dyreson, A. (2022). *Enabling Floating Solar Photovoltaic (FPV) Deployment: Exploring the Operational Benefits of Floating Solar-Hydropower Hybrids*.
- Gil-García, I. C., Fernández-Guillamón, A., García-Cascales, M. S., y Molina-García, A. (2021). A Multi-Factorial Review of Repowering Wind Generation Strategies. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196280>
- Gil-García, I. C., Fernández-Guillamón, A., García-Cascales, M. S., Molina-García, A., y Dagher, H. (2024). A green electrical matrix-based model for the energy transition: Maine, USA case example. *Energy*, 290, 130246. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.130246>
- Halkos, G. E., y Gkampoura, E.-C. (2020). Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources. *Energies*, 13(11), 2906. <https://doi.org/10.3390/en13112906>
- Iberdrola España obtiene el permiso ambiental para la primera instalación híbrida hidroeléctrica con solar del país en Cedillo (Cáceres)*. (s. f.). Recuperado 27 de diciembre de 2023, de <https://www.iberdrolaespana.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/231226-iberdrola-espana-obtiene-el-permiso-ambiental-para-la-primera-instalacion-hibrida-hidroelectrica-con-solar-del-pais-en-cedillo-caceres>
- Iweh, C. D., Semassou, G. C., y Ahouansou, R. H. (2024). Optimization of a Hybrid Off-Grid Solar PV - Hydro Power Systems for Rural Electrification in Cameroon. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/4199455>
- Jurasz, J., Tomczyk, P., Bochenek, B., Kuriqi, A., Kasiulis, E., Chen, D., y Ming, B. (2024). Solar-hydro cable pooling – Utilizing the untapped potential of existing grid infrastructure. *Energy Conversion and Management*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118307>

- Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirletz, H., Aznar, A., Spencer, R., y Cox, S. (2020). Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renewable Energy*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.080>
- Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., y Chaima, E. (2019). A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, 199, 112027. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112027>
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Zakuan, N., Jusoh, A., Nor, K. M., y Khoshnoudi, M. (2017). A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 216-256.
- Merida García, A., Gallagher, J., Crespo Chacón, M., y Mc Nabola, A. (2021). The environmental and economic benefits of a hybrid hydropower energy recovery and solar energy system (PAT-PV), under varying energy demands in the agricultural sector. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127078. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127078>
- Mufutau Opeyemi, B. (2021). Path to sustainable energy consumption: The possibility of substituting renewable energy for non-renewable energy. *Energy*, 228, 120519. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120519>
- Olkkonen, V., Haaskjold, K., Klyve, Ø. S., y Skartlien, R. (2023). Techno-economic feasibility of hybrid hydro-FPV systems in Sub-Saharan Africa under different market conditions. *Renewable Energy*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118981>
- Paraschiv, S., y Paraschiv, L. S. (2020). Trends of carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018. *Energy Reports*, 6, 237-242. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2020.11.116>
- Piencó, F., Moraes, L., Prazeres, I. dos, Lima, A. G. G., Bessa, J. G., Micheli, L., Fernández, E., y Almonacid, F. (2022). Hydroelectric operation for hybridization with a floating photovoltaic plant: A case of study. *Renewable Energy*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.077>
- Sarkis-Onofre, R., Catalá-López, F., Aromataris, E., y Lockwood, C. (2021). How to properly use the PRISMA Statement. *Systematic Reviews*, 10(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>
- Shafiullah, G. M., Masola, T., Samu, R., Elavarasan, R. M., Begum, S., Subramaniam, U., Romlie, M. F., Chowdhury, M., y Arif, M. T. (2021). Prospects of Hybrid Renewable Energy-Based Power System: A Case Study, Post Analysis of Chipendeke Micro-Hydro, Zimbabwe. *IEEE Access*, 9, 73433-73452. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078713>
- Share of electricity production by source, World.* (2020). Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/share-elec-by-source>
- Sohail, M., Afrouzi, H. N., Mehranzamir, K., Ahmed, J., Mobin Siddique, M. B., y Tabassum, M. (2022). A comprehensive scientometric analysis on hybrid renewable energy systems in developing regions of the world. *Results in Engineering*, 16, 100481. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100481>
- Syahputra, R., y Soesanti, I. (2020). Planning of hybrid micro-hydro and solar photovoltaic systems for rural areas of central Java, Indonesia. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5972342>

- Syahputra, R., y Soesanti, I. (2021). Renewable energy systems based on micro-hydro and solar photovoltaic for rural areas: A case study in Yogyakarta, Indonesia. *Energy Reports*, 7, 472-490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.015>
- Tan, Q., Wen, X., Sun, Y., Lei, X., Wang, Z., y Qin, G. (2021). Evaluation of the risk and benefit of the complementary operation of the large wind-photovoltaic-hydropower system considering forecast uncertainty. *Applied Energy*, 285, 116442. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116442>
- Tuna, M. C., y Aytac, A. (2023). Economic Assessment of Solar Hydroelectric Hybrid Power Plant a Real Case Study. *Polish Journal of Environmental Studies*, 33(1), 415-423.
- Vivas, F. J., De las Heras, A., Segura, F., y Andújar, J. M. (2018). A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 126-155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.014>
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., y Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137782>
- Zhang, B., Qiu, R., Liao, Q., Liang, Y., Ji, H., y Jing, R. (2022). Design and operation optimization of city-level off-grid hydro–photovoltaic complementary system. *Applied Energy*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118000>
- Zhang, Y., Zhao, X., Wang, X., Li, A., y Wu, X. (2023). Multi-objective optimization design of a grid-connected hybrid hydro-photovoltaic system considering power transmission capacity. *Energy*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128683>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

