

Enfoque técnico para la implantación de sistemas híbridos de energías renovables: retos, posibilidades e implicaciones

Technical approach for the implementation of hybrid renewable energy systems: challenges, possibilities and implications

Para citar este trabajo:

Ureña, J., y Martínez, J. (2024). Enfoque técnico para la implantación de sistemas híbridos de energías renovables: retos, posibilidades e implicaciones. *Reincisol*, 3(5), pp. 1428-1446. [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(5\)1428-1446](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(5)1428-1446)

Autores:

Julia Elena Ureña-Erazo

Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí
Ciudad: Portoviejo, País: Ecuador
Correo Institucional: jurena7508@utm.edu.ec
Orcid <https://orcid.org/0000-0002-4790-6382>

Alejandro Javier Martínez-Peralta

Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí
Ciudad: Portoviejo, País: Ecuador
Correo Institucional: amartinez8875@utm.edu.ec
Orcid <https://orcid.org/0000-0003-1176-5001>

RECIBIDO: 8 abril 2024

ACEPTADO: 28 mayo 2024

PUBLICADO 11 junio 2024

Resumen

Esta investigación examina exhaustivamente los sistemas híbridos de energías renovables que combinan las tecnologías solar y eólica, centrándose en sus actuales retos, oportunidades e implicaciones políticas. A pesar de los méritos individuales de los sistemas de energía solar y eólica, su naturaleza intermitente y sus limitaciones geográficas han despertado el interés por soluciones híbridas que maximicen la eficiencia y la fiabilidad mediante sistemas integrados. Un análisis crítico de la literatura disponible indica que los sistemas híbridos mitigan significativamente los problemas de intermitencia de la energía, mejoran la estabilidad de la red y pueden ser más rentables debido a la infraestructura compartida. La revisión identifica los principales retos, como la optimización del sistema, el almacenamiento de energía y la gestión de la energía sin fisuras, y analiza las innovaciones tecnológicas como los algoritmos de aprendizaje automático y los inversores avanzados que tienen el potencial para superar estos obstáculos. Es importante destacar que la revisión aclara el papel de la política en la aceleración de la adopción de estos sistemas, destacando estudios de casos exitosos de incentivos gubernamentales, asociaciones público-privadas y marcos regulatorios que han fomentado las inversiones en sistemas híbridos de energía renovable. El estudio concluye con los resultados obtenidos, que ponen de manifiesto el potencial de los sistemas híbridos de energía renovable no sólo para satisfacer la futura demanda energética de forma sostenible, sino para superarla, siempre que se realicen esfuerzos concertados en materia de investigación, inversión y formulación de políticas.

Palabras claves: Energía solar, energía eólica, fuentes renovables, sistema energético híbrido.

Abstract

This research comprehensively examines hybrid renewable energy systems that combine solar and wind technologies, focusing on their current challenges, opportunities and policy implications. Despite the individual merits of solar and wind energy systems, their intermittent nature and geographic limitations have sparked interest in hybrid solutions that maximize efficiency and reliability through integrated systems. A critical analysis of the available literature indicates that hybrid systems significantly mitigate power intermittency issues, improve grid stability, and can be more cost-effective due to shared infrastructure. The review identifies key challenges, such as system optimization, energy storage, and seamless energy management, and discusses technological innovations such as machine learning algorithms and advanced inverters that have the potential to overcome these obstacles. Importantly, the review clarifies the role of policy in accelerating the adoption of these systems, highlighting successful case studies of government incentives, public-private partnerships and regulatory frameworks that have encouraged investments in hybrid renewable energy systems. The study concludes with the results obtained, which reveal the potential of hybrid renewable energy systems not only to meet future energy demand in a sustainable way, but to exceed it, provided that concerted efforts are made in terms of research, investment and policy formulation.

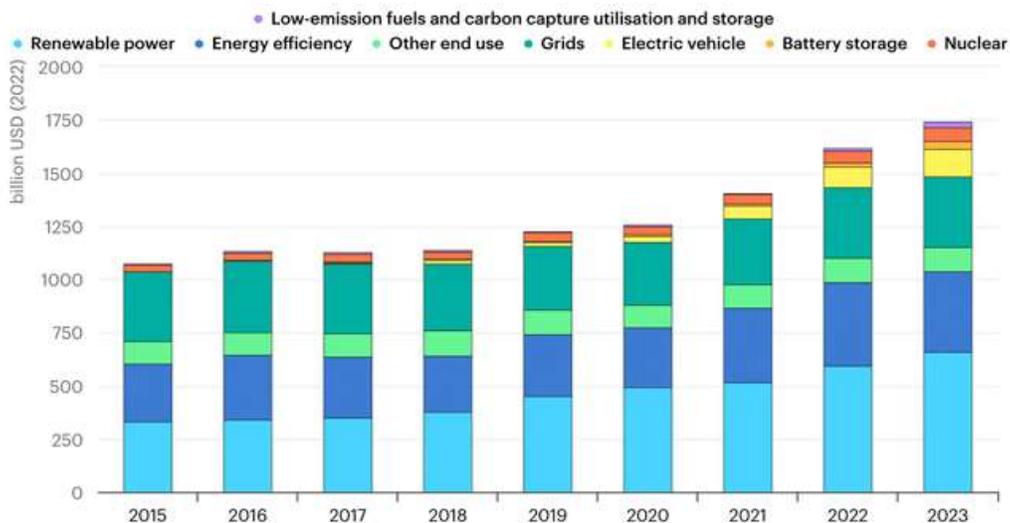
Keywords: Solar energy, wind energy, renewable sources, hybrid energy system.

INTRODUCCIÓN

La acelerada disminución de los combustibles fósiles y la creciente preocupación por el cambio climático han impulsado al mundo hacia una coyuntura crítica en la transición energética. En medio de este cambio de paradigma, los sistemas híbridos de energías renovables (HRES), en particular los que incorporan tecnologías de energía solar y eólica, han surgido como soluciones destacadas para abordar los retos de la sostenibilidad energética (Ravinder & Bansal, 2019).

La Figura 1 ilustra la notable evolución de la adaptación de la energía renovable mundial desde 2015 hasta 2023, destacando el papel fundamental que han desempeñado las energías renovables en la reconfiguración de la combinación energética, según datos de la Administración de Información Energética (EIA) (Mohammed & Suleiman, 2023).

Figura 1. Evolución de la adaptación de la energía renovable mundial desde 2015 hasta 2023



No obstante, tales sistemas permiten reducir los problemas de intermitencia inherentes a cada una de las fuentes renovables, mejorando la fiabilidad y estabilidad de la producción de energía. La energía solar alcanza su pico de producción durante las horas de sol, mientras que la eólica puede aprovecharse incluso durante los periodos de menor disponibilidad solar (Sulley et al., 2022).

Mediante la integración de estas fuentes, el suministro de energía se hace más consistente, reduciendo el riesgo de escasez de energía durante condiciones meteorológicas adversas. Por otra parte, las tecnologías de almacenamiento de energía integradas en los sistemas híbridos facilitan el almacenamiento del

excedente de energía durante los periodos de máxima producción, lo que permite su uso durante las fases de baja producción, aumentando así la eficiencia global del sistema y reduciendo el despilfarro (Chandra et al., 2020).

Asimismo, las fuentes de energía renovables de alta energía pueden contribuir significativamente a la estabilidad de la red. El carácter intermitente de las fuentes renovables autónomas puede sobrecargar las redes eléctricas existentes y provocar fluctuaciones de frecuencia y tensión (Khodayar, 2017).

La integración de sistemas híbridos con capacidad de almacenamiento de energía permite gestionar mejor estas fluctuaciones e inyectar el excedente de energía en la red durante los periodos de máxima demanda. De este modo, no sólo se mejora la estabilidad de la red, sino que también se reduce su congestión, lo que permite una integración más fluida de las energías renovables en las infraestructuras energéticas existentes.

Aunque las HRES ofrecen soluciones prometedoras, su despliegue no está exento de dificultades. Las complejidades técnicas, como la optimización de la integración de distintas fuentes y la gestión del almacenamiento de energía, exigen un examen minucioso (Nayak et al., 2018).

La viabilidad económica, incluidos los costes iniciales de instalación y los gastos de mantenimiento, debe evaluarse en el contexto de los beneficios a largo plazo. Además, deben formularse marcos políticos y normativos que incentiven la adopción de sistemas híbridos y garanticen una transición fluida hacia energías más limpias.

La integración de la energía solar y eólica en los sistemas de energía renovable de alta tensión encierra un inmenso potencial para remodelar el panorama energético mundial. Esta revisión profundiza en los retos, las oportunidades y las implicaciones políticas asociadas a estos sistemas integrados, arrojando luz sobre sus capacidades transformadoras (Mersin & Çeliktaş, 2021).

El objetivo de este trabajo es realizar un enfoque técnico para la implantación de sistemas híbridos de energías renovables, que coadyuvaran a tener un criterio mucho mas profundo.

Evaluación de la factibilidad de HRES

Normalmente, antes de la instalación y el funcionamiento, se lleva a cabo el estudio de prefactibilidad del sistema de energía híbrido. El análisis de prefactibilidad incluye el estudio de las condiciones climáticas del emplazamiento propuesto, la disponibilidad de fuentes de energía renovables y la evaluación de su carga potencial y la demanda de carga del emplazamiento de aplicación (Ramírez, 2020). El estudio de prefactibilidad ayuda a encontrar la mejor ubicación para desarrollar un sistema híbrido solar-eólico de energías renovables. A continuación, se comentan algunas contribuciones significativas de diversos investigadores.

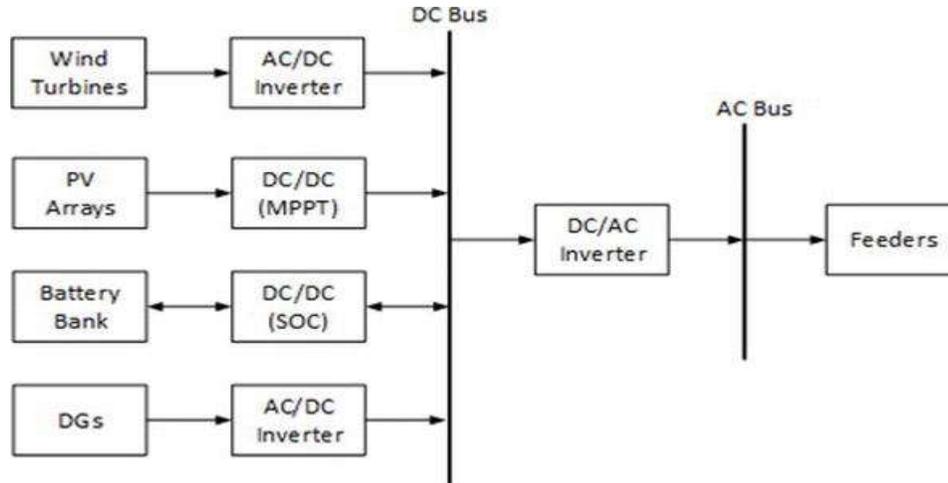
Autores como Arévalo et al., (2021); Rahman & Tam, (1988) presentaron un estudio de viabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico (PV) y de pilas de combustible, en el que se tenían en cuenta los retos que plantea el uso de PV y se ofrecían nuevas vías para la tecnología de pilas de combustible. Un sistema fotovoltaico utiliza células fotovoltaicas para convertir directamente la luz solar en electricidad y la pila de combustible convierte la energía química en electricidad mediante una reacción química con oxígeno u otro agente oxidante.

De la misma manera Al-Badi, (2013); M. J. Khan & Iqbal, (2005) describieron minuciosamente el estudio de prefactibilidad de un sistema híbrido de energía solar y eólica para su aplicación en Terranova. El hidrógeno se utiliza como vector energético para su aplicación en Terranova (Canadá). También se analizaron el dimensionamiento, el rendimiento y diversos índices de costes. El coste de capital, el coste actual neto y el coste energético para un consumo de 25 kWh/d con una demanda de potencia máxima de 4,73 kW son de \$36738, \$47910 y \$0,492 respectivamente.

Al-Badi, (2013); Xing et al., (2021) desarrollaron aspectos científicos y ecológicos del sistema híbrido, así como de la fuente de energía no convencional. Nayar et al., (2007) analizaron un estudio de caso de un sistema de energía híbrido fotovoltaico/eólico/diésel instalado en tres islas remotas de la república de Maldivas. Chong et al., (2011) presenta un análisis de prefactibilidad de un sistema eólico-solar con características de recogida de agua de lluvia para aplicaciones urbanas en edificios de gran altura. El análisis económico incluye los costes de

fabricación y conservación del sistema a lo largo de su vida útil, así como la seguridad, el impacto visual y la contaminación acústica.

Figura 2. Componente básico de un sistema híbrido de energía renovable solar-eólica.



Potencial energético

Los sistemas eléctricos híbridos constan de una serie de componentes de almacenamiento de energía y generadores. Están diseñados para satisfacer la demanda energética de las zonas rurales. Para adaptarse a las condiciones geográficas locales y otras especificaciones, se añaden generadores eólicos, fotovoltaicos y otras fuentes de energía eléctrica (Jasim et al., 2022).

Para desarrollar un sistema híbrido para un emplazamiento concreto, es esencial conocer la demanda energética particular y los recursos disponibles para ese emplazamiento. Así, para un emplazamiento concreto, los planificadores energéticos deben estudiar los recursos potenciales disponibles en energía solar, eólica y otras fuentes de energía (Jasim et al., 2022).

Sistemas de energía solar y eólica (HES) combinados

En la formación de sistemas híbridos para satisfacer una determinada demanda de carga es habitual la integración de energías renovables (RES) con otras fuentes de energía convencionales (CES) y/o dispositivos de almacenamiento de energía (ES).

Por ejemplo, la combinación de fotovoltaicos y eólicos (PV- WT), proporciona una energía más fiable para aplicaciones aisladas de la red y autónomas en comparación con los sistemas individuales (Icaza et al., 2020).

Como la energía solar y la eólica están fuertemente correlacionadas con el clima, la generada fluctúa dentro de un amplio rango, por lo que es necesario una red o un dispositivo de reserva para suministrar la carga demandada. Por lo tanto, el uso de una sola fuente, como la eólica o solar, para aplicaciones sin conexión a la red se considera poco fiable (Singh et al., 2021)(Luo et al., 2020). Además, el sistema eólico por sí solo no resulta rentable para algunas aplicaciones aisladas (Haffaf et al., 2021)(Shafiullah et al., 2022).

La combinación de fuentes de energía renovables requiere un sistema de almacenamiento de energía para compensar el desajuste entre la oferta y la demanda. Además, las CES, como los generadores diésel, o las fuentes modernas, como las pilas de combustible, también pueden añadirse a las RES para lograr un mejor equilibrio energético.

En cualquier caso, los aerogeneradores producen más energía que los sistemas fotovoltaicos por sí solos, por lo que es importante integrarlos con los sistemas fotovoltaicos para crear un sistema de generación de energía eólica y solar ecológica que no consuma diésel en aplicaciones aisladas (Jafar et al., 2018). En este contexto, la configuración solar y eólica tiene más sentido en aplicaciones conectadas a la red (Sulley et al., 2022). En aplicaciones aisladas de la red, la energía solar y la eólica suelen estar conectadas a un sistema de almacenamiento y/o a otras fuentes de energía para mantener un suministro eléctrico continuo.

Energía solar, eólica y de almacenamiento

En aplicaciones autónomas, la combinación de sistemas híbridos solares, eólicos y de almacenamiento de energía (PV-WT-ES), ampliamente utilizada, ha demostrado su fiabilidad para satisfacer las necesidades de carga de zonas remotas y rurales. En esta combinación, los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores se conectan a un dispositivo de almacenamiento para eliminar la fluctuación de potencia de los recursos solar y eólico y satisfacer la demanda de carga (Suresh, Muralidhar, et al., 2020).

El sistema híbrido PV-WT-BS ha demostrado ser la combinación más rentable para islas y zonas remotas en comparación con las configuraciones híbridas PV-BS, WT-BS y PV-WT (Haffaf et al., 2021). Esto se ha comprobado mediante un examen con siete técnicas heurísticas de optimización diferentes (A. Khan & Javaid, 2020). Además, estudios recientes han demostrado que el HES FV-WT-BS puede

satisfacer plenamente los requisitos de carga en aplicaciones residenciales en zonas remotas y rurales (Kalair et al., 2020).

El tanque de hidrógeno (HT) es otra opción de almacenamiento de energía. Sin embargo, debido a los elevados costes iniciales de este sistema de almacenamiento y a la necesidad de una celda de combustible (FC) para convertir la energía almacenada en electricidad, el sistema híbrido FV-WT FC se considera menos rentable que el sistema híbrido FV-WT-BS (Sulley et al., 2022).

Energía solar, eólica y otras fuentes de energía renovables y su almacenamiento

En esta combinación, todas las fuentes de energía combinadas con PV y WT son RES, incluidas la FC, el generador hidráulico (HG), la biomasa (BM) y el biogás (BG). La principal ventaja de esta combinación son sus emisiones de carbono mínimas o nulas. Además, el uso de más FER para compensar las fuentes convencionales aumenta la creación de empleo (EC), ya que incrementa las tasas de fabricación e instalación de sistemas renovables (Sulley et al., 2022).

El sistema de FC, que incluye electrolizador (EL) y HT, proporciona un sistema energético respetuoso con el medio ambiente y de alta eficiencia. Sin embargo, el coste inicial de este sistema es relativamente alto (Aghapouramin, 2020). Por lo tanto, la integración de FC y HT con un sistema híbrido solar y eólico puede reducir eficazmente los costes de instalación de FC y HT.

De las combinaciones de FER mencionadas anteriormente, el sistema FV-CM-CF con almacenamiento de calor es el más común, ya que proporciona una solución rentable en comparación con los sistemas FV-CF y WT-FC (Vendoti et al., 2021).

En determinados lugares, especialmente en zonas rurales y remotas, el uso de un sistema integrado de energías renovables (IRE) mediante la utilización de tantas fuentes renovables como sea posible en el lugar para producir electricidad puede ofrecer una opción más rentable que la introducción de CES.

Por ejemplo, en aldeas y zonas donde se dispone de recursos de biomasa, los sistemas FV-WT-BM-BS pueden ser una opción más rentable que el uso de CES como generador diésel. Otras combinaciones híbridas, como los sistemas PV-WT-BG BM-BS y PV-WT-BG-BM-HG-BS, también pueden proporcionar sistemas rentables y fiables en aldeas y zonas remotas (Vendoti et al., 2021).

Requisitos y parámetros de evaluación del sistema PV-WT HES

Registro de datos

Los datos de irradiación solar y velocidad del viento afectan a los resultados de la optimización del tamaño. La precisión de los resultados de la búsqueda de la solución más adecuada mejora cuando se utilizan los datos previstos en lugar de los datos de los últimos años. Por otra parte, los picos de irradiación solar y velocidad del viento influyen en los resultados de la asignación del tamaño incrementando los valores de los costos iniciales y de operación (Singh et al., 2021). En consecuencia, la aplicación de técnicas de estimación y previsión para obtener datos previstos mejora la precisión de los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de optimización del tamaño. En tal sentido Hocaoglu et al., (2009), investigaron los efectos de los datos de irradiación solar de años anteriores en el dimensionamiento de HES, y descubrieron que los datos de años anteriores no pueden producir una probabilidad de pérdida de carga (LLP) similar para un año futuro.

En su investigación Gupta et al., (2015), usaron de datos históricos y previstos en los resultados de la optimización. Los autores implementaron una red neuronal artificial entrenada por retro propagación (BPANN) para pronosticar la velocidad del viento y la irradiancia solar. El estudio encontró que los datos meteorológicos pronosticados mejoran los resultados de la optimización.

En su estudio los autores Sinha & Chandel, (2015), utilizaron una red neural artificial (RNA) para predecir datos solares y eólicos, y descubrieron que los datos predichos por la RNA se acercan a los datos medidos y estimados. Y finalmente Rajkumar et al., (2011), aplicaron un Sistema de Inferencia Neuro-Fuzzy Adaptativo (ANFIS) para modelar un módulo PV y un WT y así generar conjuntos de datos de radiación solar, velocidad del viento y temperatura. Para predecir la potencia de salida de los módulos FV y WT, se utilizan los datos meteorológicos generados para entrenar el modelo neuro-fuzzy.

Técnicas para la optimización del tamaño HES

Las técnicas de optimización del tamaño pueden clasificarse en técnicas clásicas, técnicas modernas y herramientas de software. Las técnicas clásicas utilizan métodos de construcción iterativos, numéricos, analíticos, probabilísticos y gráficos. Estos métodos utilizan el cálculo diferencial para derivar la solución

óptima. Las técnicas modernas utilizan métodos artificiales e híbridos. Estos métodos pueden determinar el sistema óptimo global y tienen mejor convergencia y precisión para encontrar un conjunto de soluciones óptimas (Srivastava et al., 2012).

El tercer enfoque de optimización del tamaño para el dimensionamiento de HES incluye herramientas de software informático. La herramienta de software más utilizada en la optimización del tamaño de HES FV-WT autónomos es Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) (Gonal & Sheshadri, 2021). Otro software, llamado Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithm (iHOGA) se ha utilizado en la optimización del dimensionamiento de HES autónomos FV-WT (Suresh, Krishna, et al., 2020).

El diseño de los HRES es complejo debido a las incertidumbres asociadas a los recursos renovables y otros factores técnicos, así como a las limitaciones asociadas a la ubicación del emplazamiento y los componentes del sistema. Las técnicas clásicas no son eficaces para resolver problemas tan complejos. Por ello, en la última década se han utilizado ampliamente técnicas modernas basadas en algoritmos metaheurísticos (Tay et al., 2022).

Las metodologías de optimización del dimensionamiento pueden utilizar una función de optimización de objetivo único (SOO) o funciones de optimización multiobjetivo (MOO). La SOO se utiliza para encontrar la solución óptima correspondiente al valor mínimo o máximo definido por la función SOO. En cambio, la MOO combina dos o más funciones objetivo individuales para determinar un conjunto de soluciones de compromiso, que permiten a los responsables de la toma de decisiones seleccionar la solución más adecuada en función de los requisitos del problema (Hoseinzadeh et al., 2020).

Elaboración de modelos de HRES

Existen distintos tipos de fuentes de energía renovables, como la solar, la eólica, la hidráulica, la biomasa, las pilas de combustible, las mareas, etc. El modelado es el primer paso para diseñar un sistema en función de los distintos parámetros y limitaciones (Oudou et al., 2020).

Lo interesante que presenta Marchetti & Piccolo, (1997), es un modelo estadístico de la energía solar eólica de alta tensión basado en el coste anual, la función de autonomía de la batería, los criterios de dimensionamiento y el factor ecológico

estadístico. Se utiliza una práctica de optimización paso a paso para encontrar el resultado adecuado del modelo de la HRES eólica solar.

Roshan et al., (2007) integra grupos electrógenos diésel con la fuente de energía renovable, presentando un modelo logístico de HRES para evaluar el ahorro de combustible y energía e informan del problema relacionado con la explotación de fuentes de energía renovables y convencionales combinadas. Una característica especial del modelo logístico es que se introduce una fuente ficticia suplementaria para obtener el equilibrio de potencia en la barra colectora durante la fase de simulación.

En cambio Khalid & Scholar, (2021), utilizaron la probabilidad de pérdida de suministro eléctrico (LPSP) para desarrollar un modelo de sistema integrado de energías renovables. Basándose en la distribución de la carga, se obtiene la función de densidad de probabilidad del almacenamiento y, en consecuencia, se calcula el tamaño de la batería para obtener el nivel pertinente de fiabilidad del sistema mediante la técnica LPSP.

Zahedi, (2002), desarrollaron un modelo estadístico de una o más matrices fotovoltaicas que se combinan con diésel y/o viento para conseguir un suministro eléctrico más fiable. Se estima un tamaño casi ideal de los componentes del sistema utilizando el programa Matrix Laboratory para predecir el rendimiento del sistema.

Badejani et al., (2007), desarrollaron un modelo de sistema híbrido autónomo fotovoltaico - eólico. Se define y optimiza una función de costes discreta para determinar la opción de diseño óptima con un número mínimo de unidades fotovoltaicas y eólicas para sostener la carga de demanda anual. La imitación del sistema y el cálculo del balance energético durante un periodo de 3 años se utilizan para compensar el error de diseño causado por la naturaleza discreta del enfoque de optimización. Belfkira et al., (2008), modelaron y optimizaron el dimensionamiento de HRES y utilizaron un algoritmo determinista para disminuir el coste del ciclo de vida del sistema, garantizando al mismo tiempo la accesibilidad de la energía.

CONCLUSIONES

La adopción de fuentes de energía renovables de alta eficiencia ofrece una opción rentable y fiable, dada la escasez de suministro de combustible y el elevado coste asociado a la ampliación de la red en islas y zonas rurales remotas.

La selección de las fuentes de energía renovables para un lugar concreto se basa en las especificaciones del emplazamiento.

Este estudio presenta una revisión exhaustiva y una comparación crítica de los métodos más recientes de optimización del tamaño de sistemas energéticos híbridos autónomos basados en energía solar y eólica.

La combinación híbrida más popular para islas y zonas rurales remotas es el sistema energético híbrido basado en energía solar, eólica y almacenamiento en baterías, ya que proporciona un suministro eléctrico más fiable y continuo. Determinar el tamaño óptimo de cada elemento es un factor clave para reducir el coste manteniendo la fiabilidad y la aceptación social.

Esta revisión muestra que el sistema energético híbrido más preferible para islas y zonas remotas es el sistema PV-WT, ya que proporciona fiabilidad y garantiza la continuidad del suministro eléctrico, seguido del PV-WT-BS por ser la combinación más respetuosa con el medio ambiente y con cero emisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghapouramin, K. (2020). Technical, Economical, and Environmental Feasibility of Hybrid Renewable Electrification Systems for off-Grid Remote Rural Electrification Areas for East Azerbaijan Province, Iran. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s40866-020-00093-5>
- Al-Badi, A. H. (2013). Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in eco-houses. *International Journal of Sustainable Engineering*, 6(1), 48–54. <https://doi.org/10.1080/19397038.2012.677491>
- Arévalo, P., Cano, A., Benavides, J., & Jurado, F. (2021). Feasibility study of a renewable system (PV/HKT/GB) for hybrid tramway based on fuel cell and super capacitor. *IET Renewable Power Generation*, 15(3), 491–503. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12056>

- Badejani, M. M., Masoum, M. A. S., & Kalanta, M. (2007). Optimal design and modeling of stand-alone hybrid PV-wind systems. 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, 1–6. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2007.4548134>
- Belfkira, R., Nichita, C., Reghem, P., & Barakat, G. (2008). Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system. 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008, 1834–1839. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635532>
- Chandra, A., Singh, G. K., & Pant, V. (2020). Protection techniques for DC microgrid- A review. *Electric Power Systems Research*, 187(June), 106439. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106439>
- Chong, W. T., Naghavi, M. S., Poh, S. C., Mahlia, T. M. I., & Pan, K. C. (2011). Techno-economic analysis of a wind-solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application. *Applied Energy*, 88(11), 4067–4077. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.042>
- Gonal, V., & Sheshadri, G. S. (2021). A hybrid bat–dragonfly algorithm for optimizing power flow control in a grid-connected wind–solar system. *Wind Engineering*, 45(2), 231–244. <https://doi.org/10.1177/0309524X19882429>
- Gupta, R. A., Kumar, R., & Bansal, A. K. (2015). BBO-based small autonomous hybrid power system optimization incorporating wind speed and solar radiation forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1366–1375. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.017>
- Haffaf, A., Lakdja, F., Meziane, R., & Abdeslam, D. O. (2021). Study of economic and sustainable energy supply for water irrigation system (WIS). In *Sustainable Energy, Grids and Networks* (Vol. 25). <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100412>
- Hocaoglu, F. O., Gerek, O. N., & Kurban, M. (2009). The effect of model generated solar radiation data usage in hybrid (wind-PV) sizing studies. *Energy Conversion and Management*, 50(12), 2956–2963. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.07.011>

- Hoseinzadeh, S., Ghasemi, M. H., & Heyns, S. (2020). Application of hybrid systems in solution of low power generation at hot seasons for micro hydro systems. *Renewable Energy*, 160, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.149>
- Icaza, D., Borge-Diez, D., Galindo, S. P., & Flores-Vázquez, C. (2020). Modeling and simulation of a hybrid system of solar panels and wind turbines for the supply of autonomous electrical energy to organic architectures. *Energies*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/en13184649>
- Jafar, M., Moghaddam, H., Kalam, A., Nowdeh, S. A., Ahmadi, A., Babanezhad, M., & Saha, S. (2018). Optimal Sizing and Energy Management of Stand-alone Hybrid Photovoltaic / Wind System Based on Hydrogen Storage Considering LOEE and LOLE Reliability Indices Using Flower Pollination Algorithm. In *Renewable Energy*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.078>
- Jasim, A. M., Jasim, B. H., & Bureš, V. (2022). A novel grid-connected microgrid energy management system with optimal sizing using hybrid grey wolf and cuckoo search optimization algorithm. *Frontiers in Energy Research*, 10(September), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.960141>
- Kalair, A. R., Abas, N., Hasan, Q. U., Seyedmahmoudian, M., & Khan, N. (2020). Demand side management in hybrid rooftop photovoltaic integrated smart nano grid. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 258). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120747>
- Khalid, S., & Scholar, M. T. (2021). Techno-economic analysis of hybrid power system (using HOMER). 8(7).
- Khan, A., & Javaid, N. (2020). Jaya Learning-Based Optimization for Optimal Sizing of Stand-Alone Photovoltaic , Wind Turbine , and Battery Systems. In *Engineering* (Vol. 6, Issue 7, pp. 812–826). THE AUTHORS. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.004>
- Khan, M. J., & Iqbal, M. T. (2005). Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. *Renewable Energy*, 30(6), 835–854. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.001>

- Khodayar, M. E. (2017). Rural electrification and expansion planning of off-grid microgrids. *Electricity Journal*, 30(4), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.04.004>
- Luo, L., Abdulkareem, S. S., Rezvani, A., Miveh, M. R., Samad, S., Aljojo, N., & Pazhoohesh, M. (2020). Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty. *Journal of Energy Storage*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101306>
- Marchetti, G., & Piccolo, M. (1997). Mathematical models for the construction of a renewable energy hybrid plant (p. (pp. 561-568)). <https://doi.org/10.1109/intlec.1997.646050>
- Mersin, G., & Çeliktaş, M. S. (2021). Integration of Renewable Energy Systems. *Handbook of Smart Energy Systems*, 1–24. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72322-4_93-1
- Mohammed, O., & Suleiman, E. (2023). Literature Review on Hybrid Photovoltaic – Diesel Power System in Sudan. *January*, 1–15. <https://doi.org/10.33552/GJES.2023.10.000748>
- Nayak, D. K., Prabakaran, N., Murugan, R., & Albert, A. J. (2018). An Improved IOT based Standalone Hybrid (Pv / Wind) System. In 2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE) (pp. 2018–2020). IEEE. <https://doi.org/doi.org/10.1109/ICRIEECE44171.2018.9009337>
- Nayar, C., Tang, M., & Suponthana, W. (2007). A case study of apvavind/diesel hybrid energy system for remote islands in the Republic of Maldives. 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, 1–7. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2007.4548114>
- Odou, O. D. T., Bhandari, R., & Adamou, R. (2020). Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin. *Renewable Energy*, 145, 1266–1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.032>
- Rahman, S., & Tam, K. (1988). A FEASIBILITY STUDY OF PHOTOVOLTAIC-FUEL CELL HYBRID ENERGY SYSTEM. 3(1).
- Rajkumar, R. K., Ramchandaramurthy, V. K., Yong, B. L., & Chia, D. B. (2011). Techno-economical optimization of hybrid pv/wind/battery system using

- Neuro-Fuzzy. Energy, 36(8), 5148–5153.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.017>
- Ramírez, V. S. R. (2020). Mejoramiento de redes eléctricas de distribución por medio de generación distribuida utilizando una metodología probabilística bivariada. Escuela politécnica nacional.
- Ravinder, K., & Bansal, H. O. (2019). Investigations on shunt active power filter in a PV-wind-FC based hybrid renewable energy system to improve power quality using hardware-in-the-loop testing platform. *Electric Power Systems Research*, 177(April). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105957>
- Roshan, A., Burgos, R., Baisden, A. C., Wang, F., & Boroyevich, D. (2007). A LOGISTICAL MODEL FOR PERFORMANCE EVALUATIONS OF HYBRID GENERATION SYSTEMS. 641–647.
<https://doi.org/10.1109/icps.1997.596040>
- Shafiullah, M., Refat, A. M., Haque, M. E., Chowdhury, D. M. H., Hossain, M. S., Alharbi, A. G., Alam, M. S., Ali, A., & Hossain, S. (2022). Review of Recent Developments in Microgrid Energy Management Strategies. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142214794>
- Singh, S., Chauhan, P., & Singh, N. J. (2021). Feasibility of Grid-connected Solar-wind Hybrid System with Electric Vehicle Charging Station. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 295–306.
<https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000081>
- Sinha, S., & Chandel, S. S. (2015). Prospects of solar photovoltaic-micro-wind based hybrid power systems in western Himalayan state of Himachal Pradesh in India. *Energy Conversion and Management*, 105, 1340–1351.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.078>
- Srivastava, A. K., Kumar, A. A., & Schulz, N. N. (2012). Impact of distributed generations with energy storage devices on the electric grid. In *IEEE Systems Journal* (Vol. 6, Issue 1, pp. 110–117).
<https://doi.org/10.1109/JSYST.2011.2163013>
- Sulley, M., Acakpovi, A., Adjei, P., Sackey, D. M., Offei, F., Afonope, M., Kofi, D., & Tay, G. (2022). Techno-Economic Assessment of Grid Connected Solar PV/Wind hybrid System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1042(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1042/1/012016>

- Suresh, V., Krishna, K. S., Venkateswarlu, P. P., & Raja, R. V. (2020). Techno-Economic Optimization of Grid Connected Distributed Energy Systems using HOMER (Vol. 6, Issue March). <http://www.ijmtst.com/volume6/issue03/31.IJMTST060372.pdf>
- Suresh, V., Muralidhar, M., & Kiranmayi, R. (2020). Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas. *Energy Reports*, 6, 594–604. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.013>
- Tay, G., Acakpovi, A., Adjei, P., Aggrey, G. K., Sowah, R., Kofi, D., Afonope, M., & Sulley, M. (2022). Optimal sizing and techno-economic analysis of a hybrid solar PV/wind/diesel generator system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1042(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1042/1/012014>
- Vendoti, S., Muralidhar, M., & Kiranmayi, R. (2021). Techno-economic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software. *Environment, Development and Sustainability*, 23(1), 351–372. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00583-2>
- Xing, L. N., Xu, H. L., Sani, A. K., Hossain, M. A., & Muyeen, S. M. (2021). Techno-economic and environmental assessment of the hybrid energy system considering electric and thermal loads. *Electronics (Switzerland)*, 10(24). <https://doi.org/10.3390/electronics10243136>
- Zahedi, A. (2002). Development of a numerical model for evaluating the performance of renewable generation systems. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON,3*, 1950–1953. <https://doi.org/10.1109/tencon.2002.1182720>

Conflicto de intereses

El autor indica que esta investigación no tiene conflicto de intereses y, por tanto, acepta las normativas de la publicación en esta revista.

Con certificación de:

