



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2026,
Volumen 10, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5

DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA HÍBRIDO RENOVABLE APLICADO A UNA COMUNIDAD RURAL EN EL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO

**OPTIMAL DESIGN OF A RENEWABLE HYBRID SYSTEM
APPLIED TO A RURAL COMMUNITY IN THE STATE OF
VERACRUZ, MEXICO**

Christian Arely Sanchez Carvajal
Instituto Tecnológico de Veracruz, México

Francisco Javier Gómez González
Instituto Tecnológico de Veracruz, México

Jorge Arturo Mendoza Sosa
Instituto Tecnológico de Veracruz, México

José Antonio Hernández Reyes
Instituto Tecnológico de Veracruz, México

Carlos Roberto González Escarpeta
Instituto Tecnológico de Veracruz, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5.26350

Diseño Óptimo de un Sistema Híbrido Renovable Aplicado a una Comunidad Rural en el Estado de Veracruz, México

Christian Arely Sanchez Carvajal¹M24023042@veracruz.tecnm.mx<https://orcid.org/0009-0004-8811-8691>Instituto Tecnológico de Veracruz
México**Francisco Javier Gómez González**francisco.gg@veracruz.tecnm.mx<https://orcid.org/0000-0001-7798-9601>Instituto Tecnológico de Veracruz
México**Jorge Arturo Mendoza Sosa**jorge.ms@veracruz.tecnm.mx<https://orcid.org/0009-0008-4027-3157>Instituto Tecnológico de Veracruz
México**José Antonio Hernández Reyes**jose.hr@veracruz.tecnm.mx<https://orcid.org/0009-0003-9346-4428>Instituto Tecnológico de Veracruz
México**Carlos Roberto González Escarpeta**carlos.ge@veracruz.tecnm.mx<https://orcid.org/0009-0003-8868-1807>Instituto Tecnológico de Veracruz
México

RESUMEN

El suministro de energía eléctrica en comunidades rurales mediante sistemas híbridos renovables exige optimizar el dimensionamiento de sus componentes para satisfacer la demanda de manera técnica y económicamente viable. Este estudio dimensionó y optimizó un sistema híbrido solar-eólico para la comunidad de Playa Emiliano Zapata en Tuxpan, Veracruz. La metodología integró la caracterización de la demanda energética y de los recursos renovables disponibles en la zona, la selección de los componentes y la simulación y optimización de las configuraciones a través del programa HOMER Pro. Para ello se evaluaron dos arquitecturas aisladas de la red: una compuesta exclusivamente por generación solar fotovoltaica, eólica y almacenamiento con baterías, y otra que incorporó un generador diésel como fuente de respaldo. Los resultados demostraron que la adición del respaldo diésel permitió reducir el dimensionamiento de los módulos renovables y del banco de baterías, lo que disminuyó significativamente la inversión inicial y el costo de la energía. En contraste, la alternativa totalmente renovable alcanzó una fracción renovable del 100% y eliminó el consumo de combustible operativo. Finalmente, la configuración con respaldo diésel se identificó como la opción óptima por su superior desempeño económico y equilibrio técnico.

Palabras clave: sistema híbrido renovable, optimización, HOMER

¹ Autor principal

Correspondencia: M24023042@veracruz.tecnm.mx

Optimal Design of a Renewable Hybrid System Applied to a Rural Community in the State of Veracruz, Mexico

ABSTRACT

Providing electricity to isolated communities via hybrid renewable systems requires optimizing component sizing to meet demand in a technically and economically viable manner. This study sized and optimized a hybrid solar-wind system for the community of Playa Emiliano Zapata in Tuxpan, Veracruz. The methodology involved characterizing energy demand and local renewable resources, selecting components, and simulating and optimizing system configurations using HOMER Pro software. Two off-grid architectures were evaluated: one consisting solely of solar photovoltaic generation, wind power, and battery storage, and another incorporating a diesel generator as a backup source. The results demonstrated that adding diesel backup allowed for smaller renewable modules and battery banks, significantly reducing both the required initial investment and the final cost of energy. In contrast, the fully renewable alternative achieved a 100% renewable fraction and eliminated operational fuel consumption. Ultimately, the configuration with diesel backup was identified as the optimal choice due to its superior economic performance and technical balance.

Keywords: renewable hybrid system; optimization; HOMER

Artículo recibido 20 agosto 2026

Aceptado para publicación: 20 setiembre 2026



INTRODUCCIÓN

El aumento de los niveles de población mundial ha propiciado un incremento en la demanda energética aunado a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha impulsado el desarrollo de sistemas híbridos basados en energías renovables (HRES). Literatura recopilada por Come Zebra, van der Windt, Nhumaio, & C. Faaij (2021), flejan como transición energética hacia sistemas con bajas emisiones de carbono ha motivado la integración de tecnologías renovables diversas, particularmente en regiones rurales donde el acceso a la red eléctrica es limitado o inexistente. No obstante, la variabilidad inherente de los recursos naturales sigue representando un desafío para garantizar un suministro continuo, estable y económicamente competitivo. En respuesta a esta problemática, los sistemas híbridos renovables, integrando tecnologías de almacenamiento, han surgido como alternativas viables para mejorar la fiabilidad y reducir los costos operativos en comunidades rurales aisladas (Breyer, Oyewo, Gulagi, & Keiner, 2023).

Por otra parte, el diseño de un sistema con las características antes mencionadas depende de factores específicos como la ubicación geográfica, la disponibilidad de recursos y la demanda energética local (Al-Badi & Al-Lawatien, 2011). Aun con las necesidades específicas de cada tipo de energía renovable, estas han empezado a ganar mucho terreno en las últimas décadas. De acuerdo con un informe de la *Agencia Internacional de Energías Renovables* del 2023, el desarrollo de tecnologías renovables ha crecido exponencialmente, destacando el desarrollo de energías basadas en fuentes de radiación solar y recursos eólicos.

La energía solar fotovoltaica transforma directamente la radiación solar en electricidad a través del efecto fotovoltaico, mientras que la energía solar térmica aprovecha esta radiación para generar calor, el cual puede ser utilizado en procesos industriales o para la calefacción de espacios. Asimismo, la energía eólica es aquella que se obtiene del movimiento de masas de aire, es decir, del viento. Este tipo de energía se aprovecha mediante aerogeneradores, que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica.

Al combinar recursos con patrones de disponibilidad diferentes, estos sistemas pueden equilibrar las fluctuaciones en la generación (intermitencia), reducir la dependencia de combustibles fósiles y optimizar la utilización de la energía disponible a lo largo del día y del año, lo cual es especialmente



necesario en zonas rurales y aisladas donde la extensión de la red eléctrica convencional es poco viable o costosa. Estudios recientes como el realizado por Seiyefa, et. al. (2024), muestran que la combinación de múltiples fuentes en HRES mejora la eficiencia operativa y la fiabilidad del suministro comparado con sistemas basados en una sola fuente de generación.

Como señala Miravet-Sanchez et.al. (2022), respecto a las comunidades alejadas, son las que más recientes la escasez de recursos energéticos tanto por distancia de los centros urbanos así como de la escasez infraestructura energética existentes para mitigar sus necesidades básicas. Es en este contexto, en donde el uso de tecnologías renovables obtiene mayor relevancia a fin de brindar independencia energética y reducir la dependencia de las redes convencionales de suministro eléctrico. Lo anterior es clave recordando que en el censo de población y vivienda del 2020 por parte del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el 1% de la población en México carece de servicio de energía eléctrica en sus viviendas, equivalente a 1.2M de personas sin electricidad en un mundo donde no se concibe una realidad sin ella.

El desarrollo de sistemas fotovoltaicos, como menciona Ponce, García, Ñeco y Alberto en un estudio de un desarrollo híbrido del 2014, permite generar electricidad y calor casi sin emisiones contaminantes, con bajos costos operativos y de forma sostenible. Además, cada nación busca aprovechar sus recursos renovables locales de manera estratégica. Sistemas como el mencionado en el estudio, permite el desarrollo de fuentes de energía para aquellas zonas que no tienen acceso a la electricidad y que al mismo tiempo necesitan fuentes rápidas o que no dependan de combustibles fósiles.

No obstante, la incorporación de diferentes fuentes de generación no garantiza por sí misma un desempeño óptimo. Una configuración inadecuada puede ocasionar un sobredimensionamiento de la capacidad instalada y un incremento de los costos de inversión, por el contrario, un subdimensionamiento resultaría insuficiente para satisfacer la demanda. Bansal (2022) señala que las metodologías de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos-eólicos deben considerar aspectos relacionados con la predicción de los recursos, la confiabilidad del suministro, los costos y las características de operación del sistema. De manera complementaria, investigaciones recientes como la realizada por Khan et.al. (2021) respecto a la optimización de sistemas por medio de HOMER Pro, han

identificado indicadores como el costo presente neto, el costo de la energía y la energía generada como algunos criterios relevantes para evaluar configuraciones alternativas.

Este tipo de proyectos, por su parte, no solo transforma las dinámicas de las comunidades rurales, sino que también introducen a nuevos actores en el escenario, lo que amplifica las dinámicas. De igual forma, como señalan Tolnov Clausen & Rudolph (2020), la implementación de estos proyectos energéticos, pueden constituir un elemento articulador del desarrollo rural al vincular mejoras en el acceso energético a las actividades económicas locales y los procesos de desarrollo comunitario, siempre y cuando se consideren características sociodemográficas y necesidades a suplir en la zona.

Thirunavukkarasu et al. (2023) señalan que la naturaleza multidimensional e incierta de los sistemas híbridos hace necesario emplear metodologías de optimización que permitan evaluar diferentes configuraciones y criterios de diseño, incluyendo enfoques clásicos, y herramientas computacionales especializadas. El empleo de programas especializados resulta particularmente útil porque permite automatizar la simulación de numerosas configuraciones y analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación. Entre estas herramientas, HOMER ha sido ampliamente utilizado para el dimensionamiento y análisis técnico-económico de sistemas híbridos, debido a su capacidad para llevar a cabo tareas como la simulación, la optimización y el análisis de sensibilidad, combinando fuentes de generación, almacenamiento y conexión a la red (Yadav, Kumar, & Kumar, 2024).

En los últimos años, HOMER se ha consolidado como una de las plataformas más empleadas para evaluar sistemas híbridos con diferentes esquemas de almacenamiento, incluyendo baterías. Su capacidad para realizar simulaciones horarias y optimizaciones basadas en costo presente neto facilita la comparación de alternativas en escenarios como la electrificación rural, mismo que se ve respaldado por estudios como el coordinado por Rice, Zhu, Zhang, & Tapa (2023) para la implementación de energías renovables y su necesidad de hibridación y optimización para las zonas centrales del Congo. En este sentido, Oladigbolu et.al. (2021) emplearon el programa HOMER a fin de comparar diferentes configuraciones de un sistema híbrido para una comunidad rural considerando factores económicos. Además, la literatura correspondiente a trabajos realizados por Naumann & Rudolph (2020) respecto a la multidimensionalidad del dimensionamiento rural, destaca que la optimización multicriterio de estos sistemas considerando simultáneamente factores técnicos, económicos y ambientales, pasa a ser un

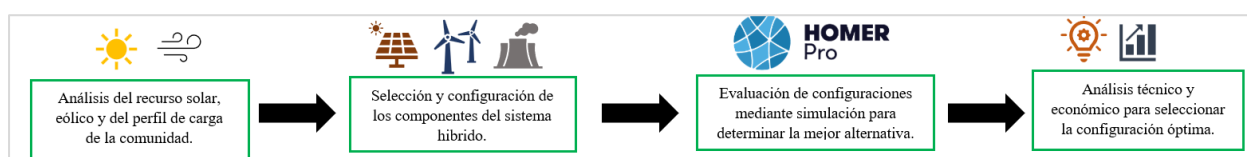


elemento de suma importancia para dimensionar adecuadamente la combinación de generación y almacenamiento, maximizando la fracción renovable del sistema y minimizando tanto el costo nivelado de energía, así como el costo presente neto bajo distintos escenarios de recursos y demanda.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio se estructuró en cuatro etapas consecutivas, orientadas al diseño y evaluación de un sistema híbrido para una comunidad modelo. El proceso comprendió inicialmente de la caracterización de los recursos renovables disponibles y de la demanda energética de la comunidad; posteriormente, se realizó la selección y configuración de los componentes que integraron las arquitecturas propuestas. A partir de esta información, se llevó a cabo la simulación y optimización de las configuraciones mediante HOMER Pro y, finalmente, se efectuó su evaluación con el propósito de comparar las alternativas planteadas. La Figura 1 muestra de manera esquemática las etapas que conformaron la metodología desarrollada.

Figura 1. Estructura de la metodología.



Caracterización de la demanda

La caracterización de la demanda de la comunidad modelo se desarrolló mediante un proceso basado en la recolección de información cualitativa y cuantitativa, a través de distintos canales de comunicación tanto con residentes de la comunidad como con personas de trabajo eventual. Se recopilaban datos sobre los hábitos de uso de la energía como los horarios de mayor actividad y las principales necesidades eléctricas de la población. En primera instancia se elaboró un levantamiento de cargas estimado, por lo que, A partir de una serie de entrevistas, se identificaron los equipos comúnmente utilizados en las viviendas, la frecuencia con la que se emplean y el número de horas promedio de funcionamiento diario. Esta información permitió construir una estimación inicial del consumo eléctrico asociado a las actividades domésticas y comunitarias, considerando aspectos como los horarios de iluminación, el uso de aparatos esenciales y la periodicidad de funcionamiento.

Posteriormente, con base en los patrones de uso reportados, se desarrolló un perfil horario representativo del comportamiento de la demanda. Para ello se distribuyó el consumo identificado a lo largo de las 24 horas del día, tomando como referencia los momentos de mayor actividad, la presencia de picos y la operación permanente de ciertos equipos. El resultado fue un perfil diario que refleja el comportamiento energético típico de un día promedio en la comunidad. Una vez definido el perfil de 24 horas, se procedió a su ampliación a escala anual. Para ello se replicó el perfil diario a lo largo de las 8760 horas del año, bajo el supuesto metodológico de que, aunque puede existir variación estacional en el uso de energía, el patrón general de consumo se mantiene relativamente estable debido a las actividades domésticas y comunitarias. Este procedimiento es un acercamiento de los 8760 datos ideados para ingresar al programa HOMER, a fin de obtener la simulación del comportamiento del sistema híbrido solar-eólico.

Caracterización del recurso renovables

La caracterización de los recursos solar y eólico se realizó a partir de información meteorológica correspondiente a la ubicación geográfica de la comunidad de estudio. Para ello, se emplearon bases de datos de acceso abierto que permitieron obtener información sobre la disponibilidad y variabilidad temporal de ambos recursos. Los datos recopilados fueron organizados en series horarias para establecer las condiciones de entrada utilizadas posteriormente en la simulación y optimización de las arquitecturas propuestas.

Para la caracterización del recurso solar se utilizó la plataforma NASA POWER realizando la consulta a partir de las coordenadas geográficas del sitio de estudio. Se obtuvieron datos de irradiación global horizontal (GHI) e irradiancia directa normal (DNI), conformando para cada variable una serie de 8760 registros correspondientes a las horas del año analizado. Esta resolución permitió conservar las variaciones horarias y estacionales del recurso solar durante el periodo contemplado.

De manera complementaria, se utilizó la plataforma Global Solar Atlas como referencia para contrastar las condiciones generales del recurso solar identificadas mediante NASA POWER. Esta consulta permitió disponer de una fuente adicional para verificar el potencial solar de la zona de estudio. La

Figura 2 muestra la interfaz de la plataforma Global Solar Atlas.



Interfaz de la plataforma Global Solar Atlas.

Ahora la caracterización del recurso eólico se utilizaron las plataformas Global Wind Atlas y NASA POWER. La primera permitió identificar la distribución espacial de la velocidad media del viento y obtener una referencia Del potencial eólico existente en la región. Por otra parte, mediante NASA POWER se obtuvieron los registros horarios de velocidad del viento a una altura de 10 m.

Al igual que para el recurso solar, la serie eólica estuvo constituida por 8760 registros horarios, permitiendo conservar la variabilidad del viento a lo largo del día y durante los diferentes periodos del año. Los datos obtenidos fueron procesados mediante el software WRPLOT View para analizar la distribución de frecuencias de la velocidad del viento, identificar las direcciones predominantes y elaborar la rosa de los vientos. Esta información permitió caracterizar las condiciones eólicas del sitio y establecer los datos necesarios para evaluar posteriormente el comportamiento de la generación eólica dentro de las arquitecturas propuestas.

Selección y configuración de los componentes del sistema híbrido

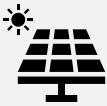
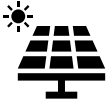
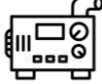
Una vez caracterizados los recursos renovables y establecido el perfil de demanda energética de la comunidad, se realizó la selección de las tecnologías consideradas para conformar el sistema híbrido. Para ello, se analizaron alternativas de generación renovable, almacenamiento, conversión de energía y generación de respaldo, considerando la función que cada tecnología desempeña dentro del sistema y su interacción con las demás.

Posteriormente, se definieron las arquitecturas a evaluar mediante diferentes combinaciones de las tecnologías seleccionadas. Las configuraciones se plantearon bajo un esquema de operación aislado, considerando alternativas destinadas a satisfacer la demanda eléctrica y compensar la variabilidad de los recursos renovables. Para cada arquitectura se estableció la interacción entre las fuentes de generación, el almacenamiento, los sistemas de conversión y la carga eléctrica.

Las arquitecturas propuestas se mantuvieron bajo las mismas condiciones de recurso y demanda, con el propósito de establecer una base común para su posterior simulación, optimización y comparación. La

Tabla 1 muestra la selección de las tecnologías para cada arquitectura.

Tabla 1.

Tecnologías Configuración	Fotovoltaica	Eólica	Generador diésel	Almacenamiento
A				
B				

Selección de tecnologías para cada configuración.

Optimización del sistema híbrido

Una vez definidas las arquitecturas, se realizó la simulación y optimización mediante el software HOMER Pro, utilizado para evaluar diferentes configuraciones de sistemas híbridos de generación eléctrica. Como datos de entrada se incorporaron las series horarias correspondientes a los recursos solar, eólico y al perfil de demanda eléctrica previamente caracterizados, además de los parámetros técnicos y económicos necesarios para representar los componentes.

Para realizar la optimización se estableció un espacio de búsqueda, definido mediante diferentes capacidades y cantidades posibles de los componentes. A partir de estos valores, el software simuló distintas combinaciones bajo las mismas condiciones de recurso y demanda, descartando aquellas que no cumplieran con las restricciones establecidas y permitiendo comparar las configuraciones factibles. Asimismo, se consideraron las estrategias de despacho Load Following (LF) y Cycle Charging (CC) para gestionar la interacción entre las fuentes de generación, el almacenamiento y la carga eléctrica.

La estrategia LF considera que la fuente de generación de respaldo produce principalmente la energía necesaria para mantener la demanda en cada periodo, mientras que la estrategia CC permite que, durante su operación la fuente de respaldo genere energía adicional que puede destinarse a la recarga del sistema de almacenamiento. Ambas estrategias fueron consideradas dentro del proceso de simulación para evaluar su efecto sobre la operación de las configuraciones propuestas.

Finalmente, Las configuraciones simuladas fueron evaluadas mediante los indicadores proporcionados por comer pro, entre los que se consideraron el costo presente neto (NPC) y el costo nivelado de la energía (LCOE), además de los costos asociados con la inversión inicial y la operación del sistema. De manera complementaria, se analizaron indicadores técnicos relacionados con la producción eléctrica, la participación de las fuentes renovables, el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos mediante este procedimiento fueron posteriormente utilizados para realizar la comparación técnica y económica de las arquitecturas evaluadas.

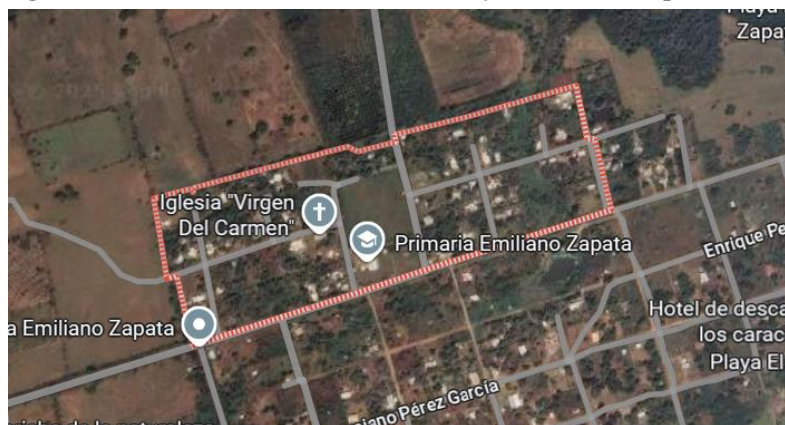
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como caso de estudio se seleccionó la comunidad de Playa Emiliano Zapata, situada en las coordenadas 20.82° N de latitud y 97.23° O de longitud, perteneciente al municipio de Tuxpan al norte del estado de Veracruz.

La comunidad presenta características de una pequeña localidad rural de baja densidad poblacional, con aproximadamente 150 habitantes y se encuentra alrededor de 14 km de la cabecera municipal y a una altura cercana a los 10 m sobre el nivel del mar. Entre los oficios y actividades identificados en el lugar se encuentran la pesca la fabricación de instrumentos relacionados con esta actividad, la alfarería y la recolección de chile, entre otras. En cuanto a las condiciones climáticas, la zona presenta un clima cálido húmedo con un rango de temperatura media de 24 a 26° C. La Figura 3 presenta la localización de Playa Emiliano Zapata.



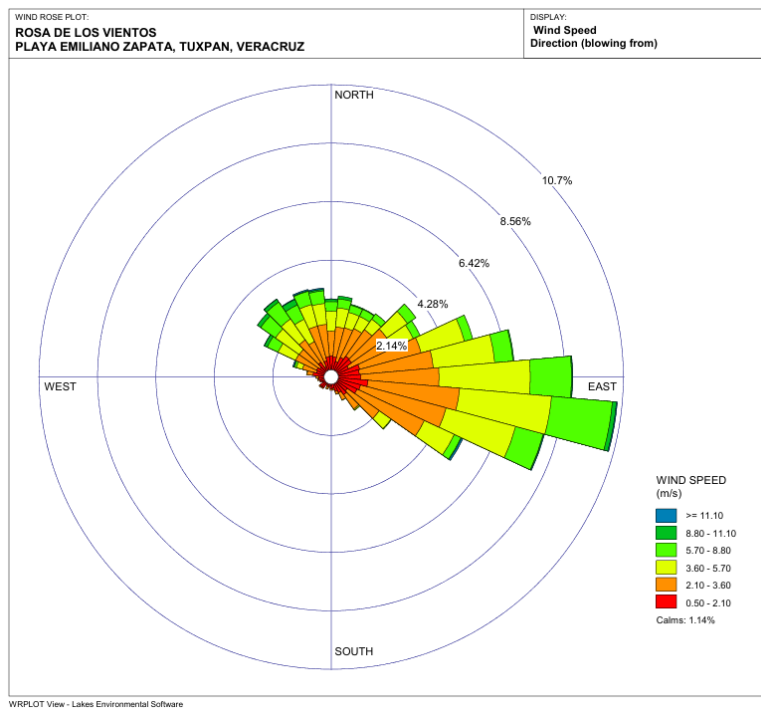
Figura 3. Vista área de la comunidad Playa Emiliano Zapata.



A partir del levantamiento de información realizado en la comunidad, se identificaron las principales cargas de las viviendas e instalaciones de uso comunitario. La caracterización permitió obtener una demanda energética promedio de 431.75 kWh/día, equivalente aproximadamente a 157.6 MWh/año y una demanda máxima de 43.75 kW. Por otra parte, la caracterización de las condiciones meteorológicas y de los recursos renovables de la zona mostró una temperatura media anual de 24.3° C, una irradiación global horizontal promedio de 4.76 kWh/m²/día y una irradiancia directa normal promedio de 3.71 kWh/m²/día.

Para el recurso eólico se obtuvo una velocidad media del viento de 3.41 m/s a 10 m de altura. La distribución de la velocidad y dirección del viento se representa mediante la rosa de los vientos mostrada en la Figura 4, en la cual se observa un predominio de los vientos provenientes del sector este con las mayores frecuencias comprendidas entre los 2.1 y 5.7 m/S, aunque también se registran velocidades de 5.7 a 8.8 m/s con menor frecuencia. Por su parte, las condiciones de calma representan únicamente el 1.14% de los registros analizados. En conjunto, la distribución observada permite identificar una dirección predominante bien definida y una presencia continua del recurso eólico durante el periodo de estudio.

Figura 4. Rosa de los vientos de la comunidad Playa Emiliano Zapata.



Resultados de optimización

A partir de las condiciones establecidas para la demanda y la disponibilidad de los recursos renovables en la comunidad, se realizó la optimización de las dos arquitecturas propuestas mediante HOMER Pro. Los resultados mostraron diferencias en el dimensionamiento de los componentes en función de la incorporación del generador diésel como fuente de respaldo.

Para la conformación de las arquitecturas propuestas se seleccionaron equipos comerciales que representan las tecnologías de generación almacenamiento y conversión consideradas en el estudio. Respecto a la generación fotovoltaica se emplearon módulos Jinko Solar JKM460-480N, Con una potencia nominal de 0.475 kW por módulo y una vida útil de 30 años. Vale el aprovechamiento del recurso eólico se seleccionó el generador AWS 5.1, con una potencia nominal de 5.1 kW por unidad. El almacenamiento de energía se representó mediante baterías PowerPlus Energy ECO4840, Con una capacidad nominal de 3.99 kWh por unidad, considerando un estado de carga inicial del 90% y un estado de carga mínimo del 20%. Para la conversión de energía entre los buses de corriente continua y corriente alterna se utilizó un inversor Enertik E-10 con una eficiencia del 96%.

Por último, para la arquitectura que contempló una fuente de generación convencional de respaldo se incorporó un generador diésel de 40 kW.

La arquitectura A estuvo constituida por generación solar fotovoltaica y eólica, almacenamiento mediante baterías y un sistema de conversión de energía, conformando una configuración aislada basada exclusivamente en fuentes renovables. Por su parte, la arquitectura B mantuvo los mismos componentes e incorporó adicionalmente el generador diésel como fuente de respaldo. Las Figuras 5 y 6 muestran los esquemas de ambas arquitecturas modeladas en HOMER Pro, así como la conexión de sus componentes mediante los continua y corriente alterna.

Figura 5 . Diseño de la arquitectura A.

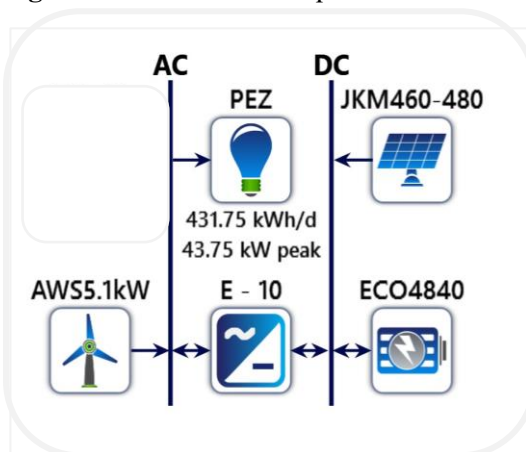
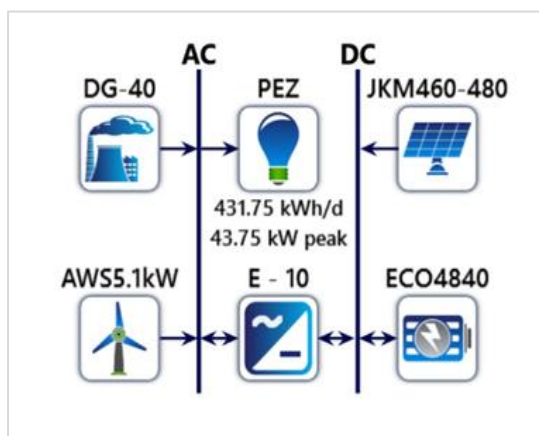


Figura 6 . Diseño de la arquitectura B.



Como se observa en la Tabla 2, El dimensionamiento de los componentes presentó diferencias importantes entre las dos arquitecturas evaluadas. La arquitectura A requirió una mayor capacidad instalada de generación renovable y almacenamiento, debido a que el suministro eléctrico dependió

exclusivamente de la disponibilidad de los recursos solar y eólico y de la energía almacenada en las baterías. En contraste, la incorporación del generador diésel en la arquitectura B permitió reducir la capacidad requerida de los componentes renovables y del sistema de almacenamiento, al disponer de una fuente de generación de respaldo capaz de operar cuando la producción renovable no fuera suficiente para atender la demanda.

Tabla 2 . Dimensionamiento de los componentes.

Componente	Modelo	Configuración a	Configuración b	Unidad
Panel fotovoltaico	Jinko Solar JKM460-480N	266	160	kW
Inversor	Enertik E-10	50	50	kW
Aerogenerador	AWS5.1	7	3	-
Batería	PowerPlus Energy ECO4840	160	130	strings
Generador diesel	DG-40	-	40	kW

En términos de dimensionamiento, la capacidad instalada fotovoltaica disminuyó de 266 kW en la arquitectura A a 160 kW en la arquitectura B, lo que representa una reducción aproximada del 39.8%. De manera similar, la capacidad instalada eólica pasó de 35.7 a 15.3 kW, equivalente a una reducción del 57.1% mientras que el número de baterías disminuyó de 160 a 130 cadenas, correspondiente a una reducción del 18.8%.

Asimismo, las configuraciones presentaron diferentes estrategias de despacho. Para la arquitectura A, HOMER Pro seleccionó Cycle Charging (CC), mientras que para la arquitectura B se obtuvo Load Following (LF). En esta última, la presencia del generador diésel permitió complementar la generación renovable en los periodos en que esta resultó insuficiente, sin que ello implicara sustituir a las fuentes renovables como principales medios de generación.

Análisis técnico

Una vez determinado el dimensionamiento de los componentes se analizó el comportamiento energético de las configuraciones optimizadas. Los resultados mostrados en la Tabla 3 presentan diferencias en la cantidad de energía producida y en la participación de cada fuente de generación, como consecuencia principalmente de la incorporación del generador diésel en la arquitectura B.

Tabla 3. Producción eléctrica de las configuraciones A y B.

Producción eléctrica	Configuración a	Configuración b	Unidad
Fotovoltaica	333,432	200,938	kWh/año
Eólica	30,323	12,996	kWh/año
Generador diesel	0	10,117	kWh/año
Total	363,755	224,051	kWh/año

En la arquitectura A, la producción eléctrica total fue de 363,755 kWh/año, de los cuales 333,432 kWh/año fueron generados por el sistema fotovoltaico, equivalentes al 91.7% de la producción total. Por su parte, los aerogeneradores aportaron 30,323 kWh/año, correspondientes al 8.34%.

Para la arquitectura B, la producción electrónica total disminuyó a 224,051 kWh/año. La generación fotovoltaica continúa representando la principal fuente de energía, con 200,938 kWh/año, equivalentes al 89.7% del total. La generación eólica aportó 12,996 kWh/año (5.8%), mientras que el generador diésel produjo 10,117 kWh/año (4.5%).

Esos resultados muestran que, aún con la incorporación del generador diésel, las fuentes renovables conservaron la mayor participación en la producción eléctrica de la arquitectura B. En particular, la generación fotovoltaica representó cerca del 90% de la producción total en ambas configuraciones, mientras que la contribución eólica fue considerablemente menor, este comportamiento es consistente con el menor recurso eólico registrado en el sitio y con el dimensionamiento obtenido para los aerogeneradores.

La producción total de la arquitectura A fue aproximadamente 62.4% superior a la obtenida en la arquitectura B. Esta diferencia se relaciona principalmente con su mayor capacidad instalada de generación fotovoltaica y eólica. Sin embargo, debido a que ambas configuraciones fueron devaluadas para satisfacer el mismo perfil de demanda, una mayor producción anual no debe interpretarse por sí sola como un mejor desempeño energético.

Análisis ambiental

La diferencia principal entre ambas arquitecturas desde el punto de vista ambiental se relaciona con la utilización de combustible fósil. La arquitectura A, al estar constituida únicamente por generación solar fotovoltaica, eólica y almacenamiento mediante baterías, no presentó consumo de combustible durante

su operación y alcanzó una fracción renovable del 100%. En consecuencia, dentro de los límites considerados por la simulación, esta configuración no generó emisiones directas asociadas a la producción de electricidad mediante combustibles fósiles.

En contraste, la arquitectura b requirió la operación del generador diésel como fuente de respaldo, con un consumo anual de 3,385 L de combustible. Como resultado HOMER Pro estimó emisiones de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados, material particulado, dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). La Figura 7 muestra la estimación de las emisiones producidas por la arquitectura B en kg/año.

Figura 7. Emisiones estimadas de la Arquitectura B mediante HOMER Pro.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	8,860	kg/yr
Carbon Monoxide	56.2	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	2.44	kg/yr
Particulate Matter	3.37	kg/yr
Sulfur Dioxide	21.7	kg/yr
Nitrogen Oxides	33.9	kg/yr

A pesar de la incorporación del generador diésel, su participación en la producción eléctrica fue de únicamente 4.52%, mientras que la configuración mantuvo una fracción renovable de 93.6%. Esto indica que el generador desempeñó principalmente una función de respaldo dentro del sistema y que la mayor parte de la electricidad continuó siendo suministrada por las fuentes solar y eólica.

Análisis económico

Los resultados económicos presentados en la Tabla 4 muestran diferencias en los indicadores económicos de las arquitecturas evaluadas. La arquitectura B requirió 153950 USD menos de inversión inicial, lo que representa una reducción aproximada del 30.2 % respecto a la arquitectura A. Desde una perspectiva financiera, esta diferencia resulta relevante debido a que disminuyen la cantidad de Capital Inicial destinado al proyecto. Esta reducción se relaciona principalmente con el menor dimensionamiento de los sistemas fotovoltaico, eólico y de almacenamiento, al incorporar el generador diésel como fuente de respaldo.

Tabla 4. Comparación de los indicadores económicos.

	Configuración A	Configuración B	Unidad
Capital inicial	509,950	356,000	USD
Costos operativos	24,113	22,370	USD
NPC	1,080,000	888,791	USD
COE	0.289	0.237	USD/ kWh

Al considerar los costos a lo largo del horizonte de evaluación mediante el costo presente neto, la diferencia entre ambas configuraciones es del 17.7%. Este comportamiento indica que la ventaja observada y la inversión inicial de la arquitectura B se atenúan cuando se incorporan los costos generados durante la vida útil del proyecto. En otras palabras, aunque esta configuración requiere una menor inversión inicial, parte de ese beneficio económico es impactado posteriormente por los gastos asociados a su operación.

Esta tendencia se aprecia en los costos operativos, cuya reducción fue únicamente del 7.2%. La diferencia con respecto al ahorro obtenido en la inversión inicial muestra que la principal ventaja financiera de la arquitectura B se concentra en una menor necesidad de capital al comienzo del proyecto y no en una reducción equivalente de los gastos recurrentes. Esta distinción es relevante al evaluar los indicadores económicos de ambas alternativas, particularmente en proyectos donde la disponibilidad de recursos para la inversión inicial puede constituir una limitante.

Por otra parte, el COE disminuyó aproximadamente un 18% con la arquitectura B, lo que indica un menor costo de suministro de energía bajo las condiciones económicas consideradas en la simulación. En este sentido, la reducción del dimensionamiento de los componentes renovables y del almacenamiento permitió disminuir el costo asociado al sistema, aún cuando la configuración incorporó gastos derivados de la operación del generador diésel.

En conjunto los resultados muestran que la arquitectura B presenta una menor inversión de capital y conserva una ventaja económica al considerar el NPC y el COE. Sin embargo, su estructura de costos incorpora una dependencia del combustible durante la etapa de operación, con un consumo estimado de 3,385 L/año. Esto introduce una mayor exposición ante posibles variaciones futuras en el precio del diésel, mientras que la arquitectura A concentra una mayor proporción de sus costos en inversión inicial

destinada a generación renovable y almacenamiento. Por lo tanto, la diferencia entre ambas alternativas no se limita al costo total, sino también a los costos distribuidos durante la vida útil del proyecto.

Comparación de arquitecturas

Los resultados obtenidos para ambas arquitecturas muestran el efecto de incorporar una fuente de generación de respaldo al dimensionamiento, la operación y los costos del sistema híbrido. La arquitectura A se orientó hacia una operación completamente renovable, sustentada en una mayor capacidad de generación solar, eólica y de almacenamiento. En contraste, la arquitectura B utilizó el generador diésel como respaldo, lo que permitió reducir el dimensionamiento de los componentes renovables y de las baterías, manteniendo una participación renovable del 93.6%.

Desde el punto de vista técnico, la principal diferencia entre ambas configuraciones radica en la forma de responder a la variabilidad de los recursos renovables. En la arquitectura A, esta condición se compensó mediante una mayor capacidad instalada y almacenamiento, mientras que la arquitectura B parte de esta función fue asumida por una fuente de generación despachable. Esta diferencia explica que la segunda configuración requiere una infraestructura renovable de menor capacidad, aunque a cambio incorporó el consumo de combustible como parte de su operación.

Esta diferencia técnica también se reflejó en el comportamiento económico y ambiental. La arquitectura B presentó menores requerimientos de capital y menores valores de NPC y COE, mientras que la arquitectura A evitó el consumo de combustible y las emisiones directas asociadas a la generación diésel. Por tanto, la reducción de costos observada en la configuración con respaldo no puede analizarse de manera aislada, ya que implica una dependencia operativa del combustible y una menor fracción renovable respecto a la alternativa basada en su totalidad en energías sustentables.

En este sentido, los resultados no muestran una misma ventaja para todos los criterios analizados, sino un compromiso entre inversión, operación y aprovechamiento de fuentes renovables. La arquitectura A concentra una mayor inversión en infraestructura renovable y almacenamiento para mantener una operación sin combustible, mientras que la arquitectura B reduce esta exigencia de capital mediante el respaldo diésel. La elección entre ambas configuraciones dependerá, por tanto, de los criterios establecidos para el proyecto y de la importancia asignada al costo del sistema, la dependencia de combustible y la participación de fuentes renovables.



CONCLUSIONES

La optimización realizada mediante HOMER Pro permitió determinar que las condiciones de recurso y demanda de Playa Emiliano Zapata pueden ser atendidas mediante sistemas de generación híbridos con diferentes niveles de participación renovable. En ambas alternativas, la generación fotovoltaica constituyó la principal fuente de suministro, mientras que la generación eólica desempeñó una función complementaria, lo cual está relacionado con las condiciones de los recursos disponibles en la zona.

La incorporación del generador diésel como fuente de respaldo modificó la estructura del sistema al disminuir los requerimientos de generación renovable y almacenamiento. Este resultado muestra que la disponibilidad de una fuente despachable permite compensar parte de la variabilidad de los recursos renovables y de reducir la capacidad instalada necesaria. Sin embargo, esta modificación implica incorporar consumo de combustible y emisiones durante la operación, aspectos que no se presentan en la configuración completamente renovable.

Desde la perspectiva económica, los resultados muestran que una mayor participación de tecnologías renovables y almacenamiento requiere una mayor inversión inicial, mientras que la incorporación del respaldo convencional disminuye los requerimientos de capital y el costo de suministro bajo las condiciones evaluadas. No obstante, esta última alternativa traslada parte de sus costos hacia la etapa de operación y genera una dependencia del combustible, por lo que su comportamiento económico a largo plazo puede estar condicionado por las variaciones en el precio del diésel.

En términos generales, el estudio muestra que el dimensionamiento de un sistema híbrido para una comunidad rural no depende únicamente de la disponibilidad de los recursos sino también de la estrategia utilizada para garantizar el suministro ante su variabilidad. En el caso analizado mantener una operación completamente renovable requiere una mayor infraestructura de generación y almacenamiento, mientras que la incorporación de respaldo despachable permite reducir estos requerimientos a cambio de una menor fracción renovable y de los impactos asociados al uso de combustible.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se identificó a la arquitectura B como la configuración óptima para el caso de estudio, debido a que permitió satisfacer los requerimientos energéticos con un menor dimensionamiento de los componentes y de almacenamiento, así como menores valores de inversión



inicial, NPC y COE. Si bien, la incorporación del generador diésel implica consumo de combustible y emisiones durante la operación, su función como fuente de respaldo permitió reducir los requerimientos de capacidad instalada y mejorar el desempeño económico del sistema, manteniendo una fracción renovable del 93.6%.

Finalmente, los resultados pueden ser considerados para profundizar en la evaluación de sistemas híbridos aplicados a comunidades con características similares. En este sentido, futuras etapas de investigación podrían incorporar información obtenida mediante periodos prolongados de monitoreo en el sitio y ampliar la evaluación mediante análisis de sensibilidad, considerando las variaciones asociadas al costo de combustible, las tecnologías de almacenamiento y los componentes del sistema. La incorporación de estos elementos permitiría fortalecer la evaluación del comportamiento técnico y económico de las configuraciones ante diferentes condiciones de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Al-Badi, A., Albadi, M., Al-Lawati, A., & Malik, A. (2011). Economic perspective of PV electricity in Oman. *Energy*, 226-232.
- Ansari, M., Jalil, M., & Bansal, R. C. (2022). A review of optimization techniques for hybrid renewable energy systems. *International Journal of Modelling and Simulation*, 722-735.
- Breyer, C., Oyewo, A., Gulagi, A., & Keiner, D. (2023). Renewable energy enabling pathways towards prosperity in Africa and South Asia . *Solar Compass*, 1-11.
- Come Zebra, E. I., van der Windt, H., Nhumaio, G., & C. Faaij, A. P. (2021). A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .
- International Renewable Energy Agency. (2023). Costes de generación de Energías Renovables en 2023. IRENA.
- Khan, F., Pal, N., & Saeed, S. (2021). Optimization and sizing of SPV/Wind hybrid renewable energy system: A techno-economic and social perspective. *Energy*.
- Miravet-Sánchez, B. L., García-Rivero, A., Yuli-Posadas, R., Inostroza-Ruiz, L. A., Fernández-Guzmán, V., Chávez-Juanito, Y. A., . . . Apesteguía-Infantes, J. A. (2022). Solar photovoltaic



- technology in isolated rural communities in Latin America and the Caribbean. *Energy Reports*, 1238-1248.
- Naumann, M., & Rudolph, D. (2020). Conceptualizing rural energy transitions: Energizing rural studies, ruralizing energy research. *Journal of Rural Studies*, 97-104.
- Oladigbolu, J., Al-Turki, Y., & Olatomiwa, L. (2021). Comparative study and sensitivity analysis of a standalone hybrid energy system for electrification of rural healthcare facility in Nigeria. *Alexandria Engineering Journal*, 5547-5565.
- Ponce Corral, C., García Villalba, L. A., Neco Caberta, R., & Alberto Valenzuela, R. (2014). Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua. *CULCyT*, 46-62.
- Rice, I. K., Zhu, H., Zhang, C., & Tapa, A. R. (2023). A Hybrid Photovoltaic/Diesel System for Off-Grid Applications in Lubumbashi, DR Congo: A HOMER Pro Modeling and Optimization Study. *sustainability*, 1-15.
- Seiyefa, V., & Abubakar, T. (2024). Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: Assessing feasibility, efficiency, and socioeconomic impact. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2190-2204.
- Thirunavukkarasu, M., Sawle, Y., & Lala, H. (2023). A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-35.
- Tolnov Clausen, L., & Rudolph, D. (2020). Renewable energy for sustainable rural development: Synergies and mismatches . *Energy Policy*, 1-10.
- Yadav, S., Kumar, P., & Kumar, A. (2024). Techno-economic assessment of hybrid renewable energy system with multi energy storage system using HOMER. *Energy*, 1-21.