

ARTICULO ORIGINAL

Evaluación técnica de una micro-red fotovoltaica para electrificación rural en el Chaco paraguayo

Technical assessment of a photovoltaic microgrid for rural electrification in the Paraguayan Chaco

*Cristhian Enrique Lopez Villasboa¹ , Gabriel Osmar López Bogado¹ ,
Federico Ivan Orue Mernes¹ , Fatima Martinez¹ 

¹Universidad del Cono Sur de las Américas, Grupo de Investigación en Tecnologías Emergentes (GITE). Asunción, Paraguay

RESUMEN

El presente estudio evalúa la prefactibilidad técnica de una micro-red fotovoltaica híbrida conectada a la red de la ANDE, con almacenamiento de respaldo para la comunidad de Nueva Mestre, ubicada en el Chaco paraguayo. El trabajo responde a las limitaciones del suministro actual proveniente de la red de la ANDE, caracterizado por interrupciones del servicio y restricciones de confiabilidad asociadas a la ubicación rural de la comunidad. La metodología empleada utilizó datos de demanda energética local, información de irradiancia solar del territorio paraguayo, referencias técnicas especializadas y herramientas de simulación energética. A partir del análisis realizado, se estimó una demanda promedio de 1.250 kWh/día y una irradiancia media de 4,80 kWh/m²/día, confirmando el potencial solar de la región para aplicaciones fotovoltaicas híbridas conectadas a red con almacenamiento. Con base en estos parámetros, se diseñó una micro-red compuesta por un sistema fotovoltaico de 250 kWp y un banco de baterías de 600 kWh, capaz de abastecer la demanda energética estimada para el escenario base de la comunidad. Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de una micro-central fotovoltaica en Nueva Mestre constituye una alternativa técnicamente viable y sostenible para mejorar el acceso a la energía eléctrica en comunidades aisladas del Chaco paraguayo.

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, micro-red híbrida conectada a red, electrificación rural, evaluación técnica, Chaco paraguayo, sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

This study assesses the technical prefeasibility of a hybrid photovoltaic microgrid connected to the ANDE power grid, with backup energy storage, for the community of Nueva Mestre, located in the Paraguayan Chaco. The study addresses the limitations of the current electricity supply provided by the ANDE grid, which is characterized by service interruptions and reliability constraints associated with the community's rural location. The methodology employed local energy demand data, solar irradiation data for Paraguay, specialized technical references, and energy simulation tools. Based on the analysis, an average energy demand of 1,250 kWh/day and an average solar irradiation of 4.80 kWh/m²/day were estimated, confirming the region's solar potential for grid-connected hybrid photovoltaic applications with energy storage. Based on these parameters, a microgrid consisting of a 250 kWp photovoltaic system and a 600 kWh battery bank was designed, capable of meeting the estimated energy demand under the community's baseline scenario. The results demonstrate that implementing a photovoltaic micro-power plant in Nueva Mestre represents a technically feasible and sustainable alternative for improving access to electricity in isolated communities of the Paraguayan Chaco.

Keywords: photovoltaic solar energy, hybrid grid-connected microgrid, rural electrification, technical assessment, Paraguayan Chaco, photovoltaic systems.

Realizado en el marco de la tesis de obtención del título de Ingeniero Electromecánico con una financiación propia

*Autor correspondiente: C. López. Universidad del Cono Sur de las Américas. Asunción, Paraguay. Correo electrónico: cristhian1912lopez@gmail.com

Fecha de envío: 28/05/2026. Revisión 18/07/2026. Aceptación: 30/07/2026.

Proceso de revisión: Evaluación por pares a doble ciego.

Editora responsable: Graciela María Patricia Velázquez de Saldivar . Universidad del Cono Sur de las Américas, UCSA.



Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los sistemas de generación eléctrica basados en fuentes renovables han adquirido una relevancia estratégica debido al crecimiento sostenido de la demanda energética, la necesidad de reducir las emisiones contaminantes y la búsqueda de soluciones sostenibles para comunidades alejadas de los sistemas eléctricos convencionales (Ali et al., 2025; Hassaine et al., 2014). En este contexto, la energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las tecnologías más prometedoras para aplicaciones de electrificación rural, especialmente en regiones con elevados niveles de irradiancia solar y limitaciones en la expansión de las redes de distribución tradicionales (IRENA, 2023).

En Paraguay, la generación eléctrica depende principalmente de fuentes hidroeléctricas, representando una de las matrices energéticas más limpias del mundo (ANDE, 2023). Sin embargo, a pesar de la elevada capacidad de generación nacional, todavía existen comunidades rurales aisladas, particularmente en la Región Occidental o Chaco paraguayo, donde el acceso a un suministro eléctrico continuo y confiable continúa siendo limitado debido a factores como la dispersión poblacional, las grandes distancias y los altos costos asociados a la expansión de la infraestructura eléctrica convencional (Lucantonio et al., 2022).

La comunidad de Nueva Mestre, ubicada en el departamento de Presidente Hayes del Chaco paraguayo, representa un caso característico de esta problemática. La comunidad recibe actualmente el suministro eléctrico de la red de la ANDE; sin embargo, su ubicación rural y las condiciones de la infraestructura existente pueden ocasionar interrupciones y restricciones en la continuidad y confiabilidad del servicio (IEA, 2022). Estas limitaciones afectan directamente el desarrollo social, productivo y económico de la población, reduciendo las posibilidades de acceso estable a servicios esenciales como educación, salud y actividades productivas (PNUD, 2023).

Frente a este escenario, las micro-redes fotovoltaicas aisladas surgen como una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible para el abastecimiento energético de comunidades rurales (Messaudi et al., 2024). La incorporación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento energético permite mejorar la estabilidad del suministro eléctrico, reducir la dependencia de combustibles fósiles y aprovechar el elevado potencial solar disponible en el Chaco paraguayo, donde la radiación solar promedio anual presenta valores favorables para la generación fotovoltaica (Itaipú Binacional & PTI, 2022).

En los últimos años, Paraguay ha comenzado a impulsar proyectos orientados a la diversificación de su matriz energética mediante la incorporación de tecnologías renovables no convencionales. Entre estas iniciativas se destacan proyectos de electrificación rural basados en energía solar, así como el desarrollo de plantas fotovoltaicas híbridas y sistemas aislados implementados por instituciones como la ANDE, el INTN e Itaipú Binacional (Viceministerio de Minas y Energía, 2013; ANDE, 2025).

Desde el punto de vista técnico, el diseño de una micro-central fotovoltaica requiere la evaluación integrada de variables relacionadas con la demanda energética, el recurso solar disponible, el dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos, el sistema de almacenamiento y la estabilidad operativa de la micro-red (Kumar et al., 2024). En este contexto, diversos estudios han analizado el uso de convertidores electrónicos, estrategias avanzadas de control y algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia como herramientas para mejorar la calidad de la energía, la regulación de corriente y la respuesta dinámica de los sistemas fotovoltaicos. Martínez et al. (2020) estudiaron el control predictivo aplicado a inversores VSI en condiciones aisladas y conectadas a red, mientras que Martínez et al. (2021) abordaron técnicas de compensación orientadas a reducir desequilibrios, potencia reactiva y distorsiones armónicas. Asimismo, Hiram González et al. (2026) compararon los algoritmos MPPT de Conductancia Incremental y Perturbación y Observación bajo condiciones variables de irradiancia, y Zucchini et al. (2025) evaluaron convertidores VSI de dos niveles y NPC de tres niveles mediante estrategias de control predictivo.

No obstante, estas tecnologías no fueron modeladas ni evaluadas en el presente estudio. El alcance del trabajo se limita al dimensionamiento técnico de los principales componentes y a la simulación de la producción energética mediante PVsyst. La selección definitiva de las topologías de conversión, los algoritmos MPPT y las estrategias de control deberá abordarse en una futura etapa de ingeniería de detalle, implementación y validación experimental. En este trabajo se presenta una evaluación técnica de una micro-central de generación fotovoltaica para la comunidad de Nueva Mestre, considerando el análisis de la demanda energética local, el potencial solar de la región, el dimensionamiento preliminar de una micro-red híbrida conectada a la red de la ANDE, con almacenamiento de respaldo y la simulación energética del sistema. Para ello, se emplearon datos provenientes de la ANDE, del Atlas de Energía Solar y Eólico del Paraguay, referencias técnicas especializadas y herramientas de simulación energética. El objetivo principal consiste en analizar la viabilidad técnica de implementar una solución fotovoltaica sostenible que permita mejorar el acceso a la energía eléctrica en comunidades rurales aisladas del Chaco paraguayo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El tipo de investigación realizada es de carácter cuantitativo-experimental, orientada al análisis técnico de una micro-central fotovoltaica híbrida conectada a la red de la ANDE, con almacenamiento de respaldo aplicada a sistemas de electrificación rural mediante fuentes renovables de energía.

La población de estudio corresponde a sistemas fotovoltaicos híbridos con almacenamiento energético, utilizados para mejorar la confiabilidad del suministro en comunidades rurales. La muestra está representada por la micro-red fotovoltaica propuesta para la comunidad de Nueva Mestre, ubicada en el departamento de Presidente Hayes, Paraguay.

El estudio fue desarrollado mediante el análisis integrado de demanda energética, disponibilidad del recurso solar, dimensionamiento preliminar del sistema fotovoltaico y simulación energética del sistema propuesto. Para ello, se emplearon datos técnicos provenientes del Atlas de Energía Solar y Eólico del Paraguay, información energética nacional suministrada por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) y parámetros de diseño obtenidos a partir de referencias técnicas especializadas y literatura científica reciente.

El sistema propuesto fue definido como una micro-red fotovoltaica híbrida conectada a la red de distribución de la ANDE, compuesta por módulos fotovoltaicos, banco de baterías, reguladores de carga, inversores, transformador de interconexión y sistema de distribución local. En condiciones normales de operación, la generación fotovoltaica abastece total o parcialmente la demanda de la comunidad, mientras que la red de la ANDE complementa el suministro cuando la producción solar resulta insuficiente. El banco de baterías fue dimensionado para cubrir parcialmente la demanda durante las horas sin generación solar y proporcionar respaldo ante interrupciones de la red. Por tanto, el sistema no fue modelado como una instalación off-grid permanente, sino como una configuración híbrida conectada a red con almacenamiento energético de respaldo.

El horizonte general de planificación del proyecto se estableció en veinte años, periodo adoptado en el estudio de prefactibilidad por corresponder a la vida útil general considerada para el sistema y resultar coherente con la duración esperada de sus principales componentes. Este horizonte representa el periodo de evaluación del proyecto y no una proyección detallada de la demanda energética. El dimensionamiento técnico se realizó a partir del escenario base estimado para 2025 y la simulación energética se desarrolló para un año meteorológico típico. No se aplicaron tasas de crecimiento poblacional ni de incremento anual del consumo, por lo que, antes de una eventual implementación, la demanda deberá actualizarse

mediante mediciones directas y escenarios de crecimiento.

La validación del estudio fue realizada mediante simulaciones y cálculos técnicos desarrollados utilizando herramientas computacionales de análisis energético y hojas de cálculo aplicadas al modelado del sistema. Se evaluaron variables relacionadas con capacidad de generación, consumo energético, almacenamiento, estabilidad operativa y desempeño energético de la micro-red.

El análisis energético se desarrolló considerando un horizonte de simulación de un año meteorológico típico TMY, por sus siglas en inglés, representativo de las condiciones climáticas medias de la región del Chaco paraguayo. La producción fotovoltaica se estimó mediante PVsyst versión 8 y sus resultados fueron consolidados con resolución mensual para los doce meses del año. La demanda se caracterizó mediante un valor medio diario de 1.250 kWh/día, derivado de la matriz de cargas residenciales, comunitarias y productivas. En consecuencia, los resultados corresponden a un escenario anual representativo y no a mediciones continuas realizadas directamente en la comunidad.

Desde el punto de vista técnico, se consultaron como marco de referencia investigaciones relacionadas con el control predictivo, los convertidores VSI, la compensación de variables eléctricas y las estrategias MPPT aplicadas a sistemas fotovoltaicos conectados y aislados (Martínez et al., 2020; Martínez et al., 2021; Hiram González et al., 2026). No obstante, estas tecnologías no fueron modeladas, implementadas ni comparadas en el presente estudio, cuyo alcance metodológico se limitó al dimensionamiento de los principales componentes de la instalación y a la evaluación de la producción energética mediante el software PVsyst. Asimismo, se consideraron criterios técnicos de diseño y desempeño energético utilizados en estudios de electrificación rural mediante micro-redes fotovoltaicas y sistemas de almacenamiento. La selección específica de convertidores, algoritmos MPPT y estrategias avanzadas de control se plantea para una futura etapa de ingeniería de detalle, implementación y validación experimental.

HIPÓTESIS

Una micro-red fotovoltaica híbrida, conectada a la red de la ANDE y adecuadamente dimensionada con almacenamiento de respaldo, permite mejorar la continuidad y confiabilidad del suministro eléctrico de la comunidad de Nueva Mestre, considerando sus condiciones de irradiancia solar y demanda energética.

PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN

¿Es técnicamente viable la implementación de una micro-central fotovoltaica híbrida conectada a la red de la ANDE, con almacenamiento de respaldo, para la comunidad de Nueva Mestre?

¿Es posible mejorar la continuidad y confiabilidad del suministro eléctrico mediante la integración de generación fotovoltaica, almacenamiento energético y respaldo de la red de la ANDE?

¿Puede una micro-central fotovoltaica híbrida constituir una alternativa sostenible y replicable para otras comunidades rurales con limitaciones en la calidad y continuidad del suministro eléctrico?

RESULTADOS

Caracterización energética de la comunidad

El sistema eléctrico paraguayo se encuentra compuesto principalmente por generación hidroeléctrica proveniente de las centrales binacionales Itaipú y Yacyretá, además de la central hidroeléctrica Acaray, administrada por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE). Paraguay posee una de las matrices energéticas con mayor participación de energía renovable en la región, debido al predominio de generación hidroeléctrica en el sistema interconectado nacional (ANDE, 2023).

A pesar de la elevada capacidad de generación instalada, existen todavía comunidades rurales alejadas que presentan limitaciones de acceso a energía eléctrica continua y confiable, principalmente en la Región Occidental del país.

La comunidad de Nueva Mestre, ubicada en la Región Occidental del Paraguay (Chaco Paraguayo), específicamente en el kilómetro 319 de la Ruta PY09 "Transchaco", distrito de Villa Hayes, departamento de Presidente Hayes, constituye el área de estudio del presente trabajo. La comunidad posee una superficie aproximada de 300 hectáreas y se encuentra distribuida en tres núcleos rurales, características típicas de asentamientos dispersos del Chaco paraguayo.

Esta comunidad, actualmente no cuenta con grupos electrógenos operativos en la localidad; el suministro proviene exclusivamente de la red nacional. La normativa vigente aplicable incluye la Norma Paraguaya de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión (INTN), el Reglamento de Instalaciones de Media Tensión de ANDE y la Ley N.º 6977/2023, con su Decreto reglamentario N.º 1168/2024.

Se elaboró una matriz de cargas residenciales, comunitarias y productivas, construida a partir de información disponible en manuales técnicos de electrificación rural, registros de consumos de ANDE, bibliografía especializada y recomendaciones internacionales para el dimensionamiento de sistemas aislados. Esta matriz permitió identificar los artefactos eléctricos típicamente utilizados en los hogares iluminación, refrigeración, bombeo de agua, equipos de comunicación además de los consumos vinculados a servicios comunitarios (postas sanitarias, escuelas, alumbrado público) y a pequeñas actividades productivas presentes en la zona.

El análisis se complementó con criterios de técnicos de la ANDE, quienes aportaron información referida a la capacidad y condiciones de operación de la línea de baja tensión que actualmente abastece a la comunidad, así como referencias sobre consumos promedio en localidades comparables del Chaco. Dichos aportes permitieron ajustar la matriz de cargas a un escenario compatible con la realidad territorial, sin necesidad de recurrir a mediciones directas en los hogares.

A partir de esta caracterización, se estimó un consumo promedio diario de aproximadamente 1.250 kWh/día, valor que se encuentra dentro del rango esperado para comunidades rurales con servicios básicos en funcionamiento y presencia de pequeñas actividades productivas. Este valor constituye la base técnica para el dimensionamiento preliminar del sistema fotovoltaico, ya que define la energía requerida para garantizar un suministro estable en condiciones normales de operación.

La matriz de cargas completa, que incluye el detalle de cada categoría de consumo y su contribución relativa al total diario, se presenta en la tabla 1 para lo que se asumió una población aproximada de 1.200 habitantes, organizada en 200 viviendas, considerando un promedio de 6 personas por hogar, distribuidas en tres núcleos rurales. Los valores de potencia se tomaron de catálogos típicos de equipos de baja potencia y de experiencias de electrificación rural, mientras que las horas de uso diario se ajustaron a los hábitos de consumo observados en comunidades similares del Chaco.

Tabla 1: Matriz de cargas residenciales, comunitarias y productivas estimada para Nueva Mestres.

N.º de unidades unitaria (W) (h) (kWh/día)	Tipo de carga o uso Potencia Uso diario Energía diaria	Cantidad			
1	Lámparas LED de 10 W en viviendas	1.000	10	5	50,0
2	Heladeras eficientes en viviendas	200	150	16	480,0
3	Ventiladores de 60 W en viviendas	400	60	8	192,0
4	Televisores LED de 80 W en viviendas	200	80	4	64,0
5	Cocinas o resistencias eléctricas pequeñas en viviendas	100	800	1,5	120,0
6	Cargadores y pequeños electrodomésticos en viviendas	200	50	5	50,0
7	Escuela: iluminación, computadoras y equipos varios	1	3.000	6	18,0
8	Puesto de salud: iluminación, equipos médicos y refrigeración	1	3.500	10	35,0
9	Centro comunitario o iglesia	1	2.000	5	10,0
10	Bombeo comunitario de agua: pozo y tanque elevado	1	8.000	6	48,0
11	Alumbrado público LED	80	40	11	35,2
12	Pequeños comercios y talleres	15	1.500	7	157,5
Total residencial					956,0
Total comunitario y productivo					303,7
Total general estimado					1.259,7

Debido a que no se dispuso de mediciones horarias directas del consumo eléctrico de la comunidad, la matriz de cargas se adoptó como perfil representativo de la demanda por categoría de consumo. Esta representación permite identificar la participación de las cargas residenciales, comunitarias y productivas en la demanda total estimada de 1.250 kWh/día. Por tanto, los valores corresponden a un escenario de diseño basado en las potencias y horas diarias de utilización de los equipos, y no a una curva horaria medida en la comunidad.

Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para el dimensionamiento preliminar de la micro-red fotovoltaica se utilizaron manuales, instructivos y normas técnicas emitidas por la ANDE, lo que permitió adaptar los criterios de diseño a la disposición geográfica y a las características operativas de la comunidad. Asimismo, se consideraron especificaciones técnicas de módulos fotovoltaicos, inversores, estructuras, baterías y demás componentes del sistema, consultadas en catálogos de fabricantes y documentos técnicos especializados.

La estimación de la generación eléctrica del sistema fotovoltaico propuesto, se consideró la irradiación solar promedio anual correspondiente a la región del Chaco Central, cuya representación de la irradiancia se observa en la Figura 1. La comunidad de Nueva Mestre se encuentra ubicada en el departamento de Presidente Hayes, aproximadamente en las coordenadas geográficas 21°40' S y 60°45' W, lo que la sitúa dentro de la zona de alta irradiación solar del Paraguay, con un promedio anual de 5,6 kWh/m²/día (PTI & Itaipú, 2016).

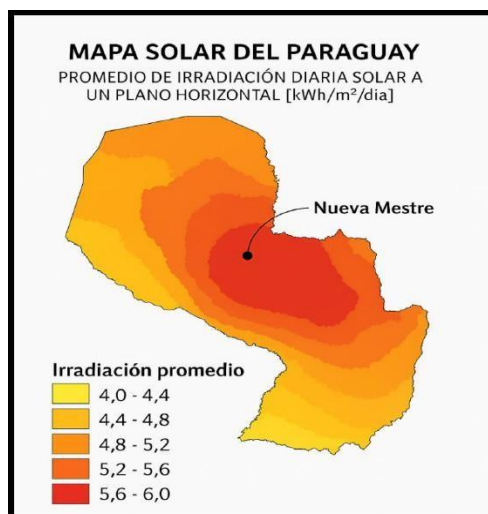


Figura 1: Energía solar media diaria anual en el Paraguay

En cuanto al recurso solar disponible, el estudio adoptó un valor de referencia de 4,8 kWh/m²/día como promedio diario anual de radiación solar, basado en relevamientos técnicos locales y consultas a profesionales de la ANDE. Cabe destacar que este valor es ligeramente conservador en comparación con lo reportado por el Atlas del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay, desarrollado por el Parque Tecnológico Itaipu y la Itaipú Binacional, el cual establece niveles promedio anuales para el Chaco Central que oscilan entre 5,5 y 6,0 kWh/m²/día, consolidándolo como una de las regiones con mayor potencial solar de Sudamérica (PTI & Itaipú, 2016).

En función de la demanda energética diaria estimada para la comunidad de Nueva Mestre, de aproximadamente 1.250 kWh/día, se procedió al dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico, considerando criterios establecidos por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) y buenas prácticas del Parque Tecnológico Itaipu

(PTI). Utilizando los cálculos detallados en anexo se definió una potencia instalada de 250 kWp en módulos solares y un banco de baterías con capacidad útil de 600 kWh, destinado a garantizar una cobertura parcial en horarios nocturnos o días nublados.

La demanda diaria utilizada para el dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico (≈ 1.250 kWh/día) proviene del procesamiento de la matriz de cargas residenciales y comunitarias elaborada para la comunidad de Nueva Mestre. Este valor sintetiza las necesidades energéticas de los hogares, los servicios comunitarios esenciales y las actividades productivas locales, constituyendo la base para el cálculo de la potencia FV y la capacidad del banco de baterías.

Tabla 2: Características técnicas de los principales equipos

Componente	Especificaciones técnicas
Generador FV	Potencia instalada aproximada de 250 kWp, compuesta por 455 módulos de 550 Wp tipo monocristalino PERC. Performance Ratio (PR) de diseño: 0,75.
Distribución de strings	23 strings distribuidos en 18 strings de 20 módulos y 5 strings de 19 módulos. String típico de 20 módulos: $V_{mpp} \approx 834$ V y $V_{oc}(25^\circ C) \approx 998$ V, dentro del rango MPPT del inversor.
Baterías	Capacidad útil de 600 kWh. Tecnología LiFePO ₄ . Profundidad de descarga admisible del 90 % y eficiencia ida-vuelta aproximada del 92 %.
Inversores	Potencia total AC de 300 kVA, trifásicos, onda senoidal y eficiencia superior al 96 %. Rango MPPT compatible con strings de 20–19 módulos. Tensión DC máxima aproximada entre 1100–1500 V.
Transformador de interconexión	Transformador MT/BT 0,4/23 kV de 400 kVA tipo ONAN, con impedancia típica del 5 %, conforme a IEC 60076-1 y criterios de distribución ANDE.
Estructuras y protecciones	Estructura fija con inclinación aproximada de 15°. Protecciones DC/AC, puesta a tierra, seccionamiento y sistema de pararrayos conforme a IEC y ANDE.
Producción anual estimada	Producción energética aproximada de 456.000 kWh/año obtenida mediante simulación en PVsyst considerando un PR cercano a 0,75.

Se seleccionaron módulos fotovoltaicos de 550 Wp de potencia nominal, resultando un total de 455 unidades para alcanzar una potencia instalada de aproximadamente 250,25 kWp. El sistema cuenta con un banco de baterías con 600 kWh de capacidad útil, diseñado para cubrir la demanda durante las horas sin generación solar y ofrecer respaldo en caso de interrupciones del suministro eléctrico de la red de ANDE.

La configuración del sistema contempla inversores trifásicos adaptados a la potencia instalada y a la topología de conexión definida. La Tabla 2 resume las características técnicas de los principales equipos considerados en el diseño, incluyendo el generador fotovoltaico, la distribución de strings, el banco de baterías, los inversores, el transformador de interconexión, las estructuras de soporte, las protecciones y la producción anual estimada.

Para satisfacer dicha demanda con un margen adicional que considere variaciones estacionales y posibles incrementos futuros, se diseñó un sistema con una capacidad nominal total de 250 kWp en módulos fotovoltaicos. Se seleccionaron 455 módulos de 550 Wp, tecnología ampliamente utilizada en Paraguay por su relación tecnología ampliamente utilizada en aplicaciones fotovoltaicas de mediana escala debido a su elevada densidad de potencia y compatibilidad con sistemas de generación distribuida.

Estos módulos se distribuyen en 23 strings: 18 de 20 módulos y 5 de 19 módulos, lo que garantiza que la tensión de operación de cada string se mantenga dentro del rango admisible de los inversores seleccionados.

En cuanto al almacenamiento, se dimensionó un banco de baterías con una capacidad útil aproximada de 600 kWh, destinado a cubrir parcialmente la demanda nocturna y mitigar cortes, conforme a prácticas recomendadas en sistemas rurales (Itaipú Binacional & PTI-PY, 2022). El banco se conformará por unidades modulares de 2 V o 12 V, configuradas en serie-paralelo para alcanzar el voltaje y la capacidad necesaria, con dispositivos de monitoreo del estado de carga conforme al reglamento técnico nacional.

El controlador de carga fue dimensionado para gestionar la corriente máxima asociada al conjunto de módulos solares y al banco de baterías. La corriente teórica se calculó mediante la siguiente expresión:

$$I_{FV} = \frac{P_{array}}{V_{Banco}}$$

Donde:

P_{array} es la potencia fotovoltaica instalada y V_{Banco} es la tensión nominal asumida para ese sistema de almacenamiento y tiene un valor de 480V

Considerando una potencia fotovoltaica instalada de 250,25 kWp y una tensión nominal del banco de 480 V, se obtuvo una corriente aproximada de 521 A. A partir de este valor, se seleccionó un controlador capaz de soportar dicha corriente de entrada continua en condiciones nominales, incluyendo un margen de seguridad del 10 %. Asimismo, el equipo es compatible con la tensión nominal del banco y con el tipo de baterías especificado, LiFePO₄, asegurando una gestión adecuada del ciclo de carga y descarga, y la protección integral del sistema de almacenamiento.

Para la conversión y regulación, se seleccionaron inversores trifásicos con una potencia nominal mínima conjunta de 300 kVA, considerando el factor de simultaneidad y el rendimiento de los

equipos ($\geq 96\%$), lo cual coincide con experiencias documentadas en el país que reportan eficiencias entre 90% y 95% (ANDE, 2023a). La selección de inversores y controladores cumple con los requisitos de certificación y compatibilidad establecidos por la ANDE para instalaciones fotovoltaicas de mediana escala en zonas rurales.

Finalmente, el diseño considera el cumplimiento del Reglamento para Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión y del Reglamento de Media Tensión de la ANDE, en aspectos como calibre y aislamiento del cableado, protecciones diferenciales y térmicas, conexión a tierra y señalización, conforme a lo establecido en la normativa nacional (ANDE, s.f.; ANDE, 2023b).

Evaluación del desempeño energético del sistema

El diseño preliminar de la micro-red fotovoltaica para la comunidad de Nueva Mestre fue realizado considerando manuales, instructivos y normativas técnicas emitidas por la ANDE, permitiendo adaptar los criterios de diseño a las características geográficas y operativas de la comunidad. Asimismo, se consideraron especificaciones técnicas y referencias comerciales correspondientes a módulos fotovoltaicos, inversores, estructuras y sistemas de almacenamiento energético.

Para el dimensionamiento preliminar del sistema se consideró como referencia el valor regional de irradiación solar promedio anual de $5,6 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$, reportado para el Chaco Central por el Atlas del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay (PTI & Itaipú, 2016). No obstante, para la simulación energética mediante PVsyst v8.0 se adoptó un escenario conservador de $4,8 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$, incorporado mediante el archivo climático TMY utilizado en el modelado. La simulación consideró una configuración de 455 módulos fotovoltaicos de 550 Wp , correspondiente a una potencia total instalada de $250,25 \text{ kWp}$, y un banco de baterías de 600 kWh útiles.

El modelo de simulación arrojó una producción anual estimada de aproximadamente 456.000 kWh/año , lo que representa una cobertura significativa de la demanda eléctrica anual de la comunidad de Nueva Mestre. Este resultado considera el efecto conjunto de las pérdidas por temperatura, orientación, sombreados, suciedad y eficiencia de conversión, reflejadas en un factor de rendimiento global (PR) cercano al 75% . Dicho valor se encuentra dentro de los estándares reportados para instalaciones fotovoltaicas en zonas de alta radiación y temperatura, como el Chaco paraguayo, y permite evaluar el impacto combinado de las pérdidas eléctricas y ambientales sobre la producción real del sistema en comparación con su potencial teórico.

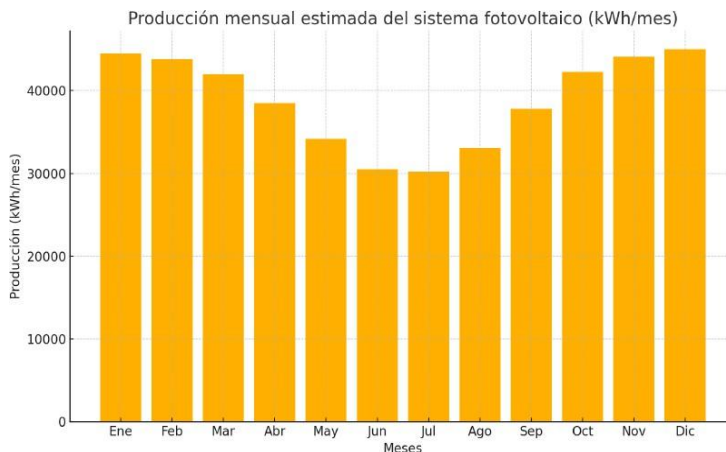
Para evaluar el aporte del sistema durante interrupciones de la red, se consideraron los indicadores de calidad de servicio eléctrico registrados por la ANDE para zonas rurales, que reportan una frecuencia promedio de 10 cortes/año y una duración media de 3 horas por evento (ANDE, 2022). Estos valores representan una energía no suministrada de aproximadamente 37.500 kWh/año, de los cuales el sistema propuesto, mediante la combinación de generación fotovoltaica y almacenamiento en baterías, podría mitigar alrededor del 80 %, reduciendo de manera significativa el impacto de los cortes en la comunidad.

La simulación contempló además factores críticos que inciden directamente sobre la producción efectiva del sistema mostrados en la tabla 3.

Tabla 3: Análisis Energético detallado del sistema.

Factor de pérdida	Porcentaje estimado (%)	Descripción
Pérdidas por temperatura	6%	Degradación por alta temperatura ambiente ($>38^{\circ}\text{C}$), típica del Chaco Paraguayo.
Pérdidas por orientación e inclinación fija	2%	Sistema sin seguidores solares, con inclinación fija optimizada a 15° .
Pérdidas por suciedad y polvo	3%	Acumulación de partículas sobre módulos debido al clima seco del Chaco.
Pérdidas por sombreados parciales menores	1%	Sombras puntuales producidas por estructuras bajas o vegetación cercana.
Pérdidas eléctricas (cables y conexiones)	2%	Pérdidas resistivas normales en instalación DC y AC.
Rendimiento del inversor	8% (equivalente)	Conversión DC/AC con eficiencia típica del 92%.
Factor de rendimiento global (PR)	$\sim 75\%$	Relación entre energía efectiva entregada y energía solar incidente total.

Para complementar los resultados numéricos y visualizar la variación temporal de la producción energética, la Figura 2 presenta el perfil mensual representativo de generación fotovoltaica obtenido mediante la simulación en PVSyst para el año meteorológico típico considerado.



Fuente: Elaboración propia con base en simulación PVSyst (2025) y datos climáticos del Atlas Solar PTI & Itaipú (2016).

Figura 2: gráfica mensual de producción fotovoltaica.

Las pérdidas por temperatura en regiones como el Chaco paraguayo, donde las temperaturas máximas superan regularmente los 38 °C, se estimaron en torno al 6 %, asociadas al descenso en la eficiencia de conversión de los módulos debido al coeficiente térmico del silicio cristalino (ANDE, 2023a).

En cuanto a las pérdidas por orientación e inclinación, dado que el sistema se instalará con ángulo fijo optimizado para el promedio anual, aproximadamente 15° respecto a la horizontal y acorde a la latitud local, se calcularon pérdidas cercanas al 2 % respecto a un seguimiento óptimo diario.

Respecto a las pérdidas por suciedad y sombreado parcial, se consideró un 3 %, teniendo en cuenta la acumulación de polvo característica del Chaco y la baja presencia de vegetación densa.

Para la eficiencia global del sistema inversor-cableado se adoptó un valor del 92 %, equivalente a pérdidas en torno al 8 %, en línea con instalaciones similares verificadas en proyectos de electrificación rural (ANDE, 2023b).

Sumando todos estos factores, el factor de rendimiento global (PR) del sistema se estimó en torno al 75 %, valor que representa la proporción entre la energía efectivamente entregada a la red interna de la comunidad y la energía potencial calculada únicamente a partir del recurso solar incidente. Este nivel de PR se encuentra dentro de los estándares internacionales y regionales para sistemas fotovoltaicos en climas semiáridos (IRENA, 2015).

Con una potencia instalada de 250 kWp, el sistema alcanzaría una producción anual aproximada de 456.000 kWh/año, equivalente a un promedio de 38.000 kWh/mes. La generación presenta variaciones

estacionales de aproximadamente $\pm 20\%$, con valores máximos en los meses de primavera-verano, cercanos a 45.000 kWh/mes, y mínimos en invierno, alrededor de 30.000 kWh/mes.

Este comportamiento estacional es consistente con los registros históricos de radiación solar en el Chaco Central y con el factor de rendimiento global aplicado en la simulación. Estos resultados permiten prever la necesidad de gestionar adecuadamente la demanda y el almacenamiento energético durante los meses de menor producción solar.

Dimensionamiento del Transformador MT/BT

El sistema fotovoltaico propuesto considera una potencia instalada de 250 kWp, asociada a inversores trifásicos con una capacidad nominal total de 300 kVA. Para el acople con la red de distribución se adoptó un transformador MT/BT de 0,4/23 kV.

Para la etapa de conversión, se seleccionaron inversores trifásicos con una potencia nominal total de 300 kW. Considerando una potencia pico instalada de 250,25 kWp y un criterio de sobredimensionamiento DC/AC de 1,2, se requiere una potencia mínima de inversor de aproximadamente 208 kW. Con un factor de potencia de 0,9, la potencia activa disponible del conjunto de inversores alcanza aproximadamente 270 kW, por lo que la selección de 300 kVA resulta adecuada para cubrir la potencia del generador fotovoltaico y absorber sobrepotencias temporales sin afectar el desempeño general del sistema.

Para el cálculo del transformador se empleó un factor de potencia de 0,8, obteniéndose una potencia de referencia de 375 kVA. Sin embargo, por criterios de robustez térmica, disponibilidad comercial y margen frente a sobrecargas puntuales, se seleccionó un transformador trifásico de 400 kVA tipo ONAN. Esta selección se ajusta al criterio establecido en la norma IEC 60076-1, según la cual el equipo debe dimensionarse en función de la potencia nominal máxima y condiciones térmicas de operación (IEC, 2011).

La Tabla 4 presenta los valores asociados al transformador consideradas para los lados de media y baja tensión. En el lado MT, la corriente nominal estimada es reducida, aproximadamente 10 A, por lo que se consideran calibres normalizados compatibles con acometidas de distribución de ANDE.

En el lado BT, la corriente trifásica aproximada de 577 A exige conductores de cobre con aislamiento XLPE y configuración en paralelo por fase, adecuados para capacidad térmica y caída de tensión inferior al 2 %. Con base a estos valores, la configuración adoptada permite garantizar capacidad de conducción suficiente, compatibilidad con criterios técnicos de interconexión y operación segura del sistema en condiciones nominales.

Tabla 4: Parámetros eléctricos y de selección del transformador MT/BT.

Parámetro	Valor
Potencia fotovoltaica instalada	250 kWp
Potencia nominal de inversores	300 kVA
factor de Potencia	0,8
Potencia de referencia calculada	375 kVA
Potencia seleccionada del transformador	400 kVA
Nivel de tensión MT	23 kV
Nivel de tensión BT	0,4 kV
Tipo de transformador	Trifásico ONAN
Corriente nominal lado BT	≈ 577 A
Corriente nominal lado MT	≈ 10 A
Impedancia considerada	5 %
Corriente estimada de cortocircuito BT	≈ 11,5 kA

Configuración y modelado del sistema fotovoltaico

Para proyectar con precisión la producción energética anual y mensual del sistema fotovoltaico diseñado para la comunidad de Nueva Mestre, se recurrió a una simulación detallada mediante el software especializado PVsyst versión

8. Esta herramienta es ampliamente reconocida en el ámbito de la ingeniería eléctrica y energética para la evaluación de sistemas solares fotovoltaicos, tanto conectados a red como aislados, permitiendo integrar datos climáticos locales, características del emplazamiento, parámetros técnicos de los equipos y escenarios de pérdidas específicas.

Como herramienta principal se utilizó un archivo climático tipo TMY (Typical Meteorological Year), ajustado con los valores conservadores relevados para la zona del Chaco paraguayo, donde se consideró un promedio de irradiancia global diaria de 4,8 kWh/m²/día. Este valor fue seleccionado de forma prudencial respecto al rango indicado en el Atlas del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay, que sitúa a la región del Chaco Central entre 5,5 y 6,0 kWh/m²/día (PTI & Itaipú, 2016).

En el modelado se configuró una instalación con ángulo fijo de 15°, orientada hacia el norte geográfico (azimut = 0°), lo cual optimiza la captación anual dada la latitud del Paraguay (~23° S). Para el análisis de pérdidas por sombreados, se estableció un horizonte virtual libre de obstrucciones relevantes, en concordancia con las características topográficas planas del sitio. Las pérdidas específicas incorporadas al simulador incluyeron los parámetros calculados previamente.

La Figura 3 presenta el entorno de simulación del software PVsyst v8 utilizado para el análisis energético del sistema fotovoltaico. La simulación fue desarrollada considerando orientación azimutal de 0° e inclinación fija de 15° , parámetros adoptados para optimizar la captación solar anual en la región del Chaco paraguayo.

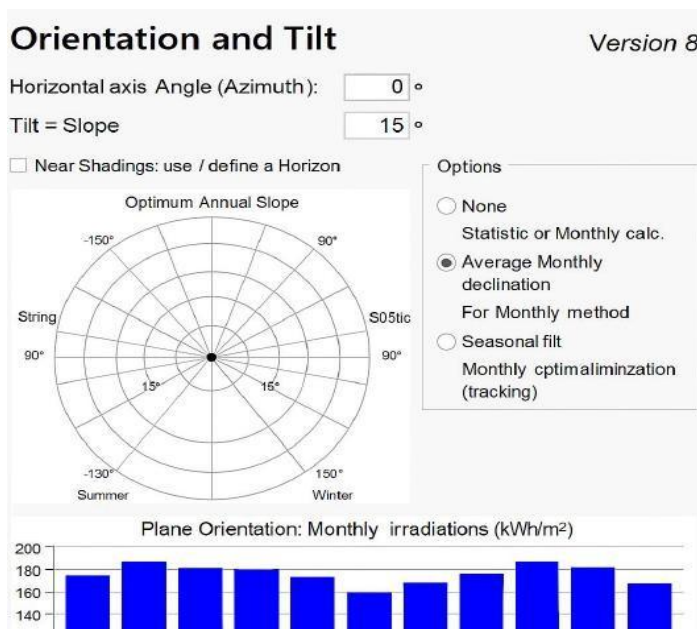


Figura 3: Imagen del entorno del software de simulación energética.

La Figura 4 presenta el layout general del sistema fotovoltaico propuesto, incluyendo la configuración del generador FV, inversores trifásicos, transformador de interconexión y acople a la red de media tensión de ANDE. La arquitectura considerada contempla 455 módulos fotovoltaicos distribuidos en 23 strings conectados a inversores trifásicos con capacidad total de 300 kVA y un transformador MT/BT de 400 kVA para interconexión a 23 kV.

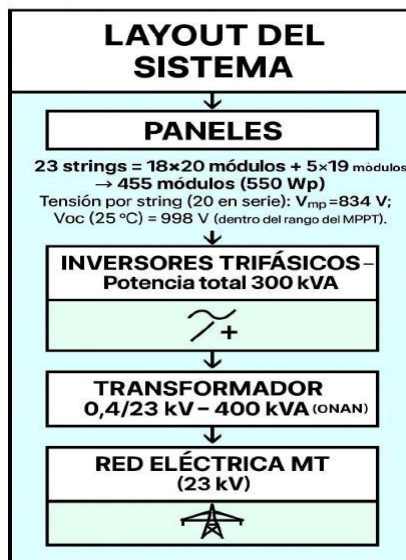


Figura 4: Layout general del sistema fotovoltaico propuesto.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones recientes orientadas a la electrificación rural mediante micro-redes fotovoltaicas, las cuales destacan que los sistemas aislados basados en energía solar constituyen una solución sostenible y técnicamente viable y sostenible para comunidades alejadas de las redes eléctricas convencionales (IRENA, 2023). Asimismo, diversos autores han señalado que las micro-redes renovables permiten incrementar la resiliencia energética y mejorar las condiciones de acceso a servicios esenciales en regiones con limitaciones de infraestructura eléctrica (Lucantonio et al., 2022; PNUD, 2023).

Desde el punto de vista técnico, el dimensionamiento realizado permitió determinar una configuración capaz de satisfacer la demanda energética estimada para el escenario base considerando las condiciones climáticas de la región y los perfiles de consumo de la comunidad. La incorporación de sistemas de almacenamiento energético resulta especialmente relevante debido a la naturaleza intermitente de la generación fotovoltaica, permitiendo garantizar la continuidad del suministro durante periodos de baja irradiancia o durante horarios nocturnos. En este sentido, Yang et al. (2024) destacan que la integración adecuada de baterías constituye uno de los elementos fundamentales para mejorar la estabilidad y confiabilidad de micro-redes renovables aisladas.

Asimismo, el análisis desarrollado demuestra que la utilización de sistemas fotovoltaicos híbridos conectados a red y con almacenamiento de respaldo no solo contribuye a reducir emisiones contaminantes y dependencia energética, sino que también puede generar impactos positivos en el desarrollo social y productivo de comunidades rurales. La disponibilidad de un suministro eléctrico continuo favorece el funcionamiento de servicios básicos, mejora las condiciones educativas y sanitarias, y facilita el desarrollo de actividades económicas locales.

En relación con el estado del arte, las investigaciones sobre algoritmos MPPT, convertidores electrónicos y estrategias avanzadas de control presentan alternativas que podrían mejorar el desempeño dinámico, la estabilidad operativa y la calidad de energía de los sistemas fotovoltaicos (Martínez et al., 2020; Martínez et al., 2021; Hiram González et al., 2026; Zucchini et al., 2025). Sin embargo, estas tecnologías no fueron evaluadas en el presente estudio, cuyo alcance se concentró en el dimensionamiento técnico y la simulación energética mediante PVsyst. Su incorporación deberá analizarse en una futura etapa de ingeniería de detalle, particularmente durante la selección definitiva de los inversores, el desarrollo del sistema de control y la validación experimental de la instalación.

No obstante, el presente estudio presenta algunas limitaciones. El análisis desarrollado se basó principalmente en simulaciones y estimaciones técnicas realizadas a partir de datos climáticos y perfiles de demanda disponibles, por lo que futuras investigaciones podrían incorporar validaciones experimentales, monitoreo en tiempo real y análisis operativos bajo condiciones reales de funcionamiento. Asimismo, sería conveniente evaluar escenarios híbridos que integren otras fuentes renovables, estrategias avanzadas de gestión energética y técnicas de optimización orientadas a mejorar aún más la eficiencia y confiabilidad del sistema.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten concluir que las micro-redes fotovoltaicas híbridas conectadas a red y con almacenamiento de respaldo constituyen una alternativa prometedora para contribuir al desarrollo energético sostenible del Paraguay, especialmente en comunidades rurales alejadas del sistema interconectado nacional. La implementación de este tipo de soluciones podría desempeñar un papel relevante en futuros programas de electrificación rural y transición energética impulsados a nivel nacional.

Contribución de autores

C. López: participó en la recopilación de información técnica, el análisis de la demanda energética, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y la elaboración de los resultados del estudio.

G. López: colaboró en el procesamiento de datos técnicos, la caracterización energética de la comunidad, el desarrollo de cálculos de diseño y la sistematización de los resultados obtenidos.

F. Orue: Supervisó el desarrollo técnico del trabajo, orientó la metodología del estudio, colaboró en la interpretación de los datos experimentales.

F. Martínez: redacción del manuscrito, se encargó de la revisión bibliográfica contribuyendo en la sección del estado del arte.

Financiamiento: Ninguno.

Conflicto de interés: Sin conflicto.

Disponibilidad de datos: los datos que respaldan los resultados de este estudio están disponibles a solicitud del autor correspondiente, C. López. Correo electrónico: cristhian1912lopez@gmail.com

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, M. H., Zakaria, M., & El-Tawab, S. (2025). A comprehensive study of recent maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. *Scientific Reports*, 15(1), 14269.
- Administración Nacional de Electricidad (ANDE). (2020). Reglamento general de condiciones de suministro de energía eléctrica. <https://www.ande.gov.py>
- Administración Nacional de Electricidad (ANDE). (2023). Memoria anual 2023. https://www.ande.gov.py/informes/memorias/MEMORIA_ANUAL_2023_ANDE.pdf
- Administración Nacional de Electricidad (ANDE). (2023). Plan maestro de electrificación rural. https://www.ande.gov.py/ande_content/planificacion
- Administración Nacional de Electricidad (ANDE). (s.f.). Reglamento para instalaciones eléctricas de baja tensión. https://www.ande.gov.py/ande_content/reglamentos
- Administración Nacional de Electricidad (ANDE). (s.f.). Procedimientos para la elaboración de proyectos de líneas de distribución de media y baja tensión. <https://informacionpublica.paraguay.gov.py/public/10720513-ANDE010313Rev1-ProcedimientosparaelaboracindeProyectospdf-ANDE01.03.13Rev.1-ProcedimientosparaelaboracindeProyectos.pdf>
- Banco de Datos de la Biblioteca y Archivo Central del Congreso Nacional (BACN). (2023). Ley N.º 6977/2023 que regula el fomento, generación, producción, desarrollo y utilización de energía eléctrica a partir de fuentes renovables no convencionales no hidráulicas. <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/11281>

- Hassaine, L., Olias, E., Quintero, J., & Salas, V. (2014). Overview of power inverter topologies and control structures for grid-connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 796–807.
- Hiram González, A., Zucchini, G., Martínez, F., Gregor, R., Pacher, J., González, O., & Caballero, D. (2026). Análisis comparativo de los algoritmos MPPT de conductancia incremental y perturbación & observación en sistemas fotovoltaicos conectados a la red: Rendimiento en condiciones de irradiancia dinámica. *Revista Científica de la UCSA*, 13(1), 3.
- International Energy Agency (IEA). (2020). Projected costs of generating electricity 2020. IEA Publications.
- International Energy Agency (IEA). (2022). World energy outlook 2022. IEA Publications.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2015). Renewable energy technologies: Cost analysis series. Solar photovoltaics. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_RE_Costs_Solar_PV.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2015). Renewable power generation costs in 2014. <https://www.irena.org/publications/2015/Jan/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2014>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). Evaluación del entorno normativo para energías renovables en Paraguay. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Sep/IRENA_RRA_Paraguay_2021_ES.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). Renewable power generation costs in 2020. IRENA.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Off-grid renewable energy systems: Status and methodological issues. IRENA.
- Itaipú Binacional & Parque Tecnológico Itaipú (PTI). (2022). Atlas de energía solar y eólico del Paraguay.
- Kumar, P., Ranjan, R., & Yadav, A. K. (2024). Comparative power quality performance evaluation of grid-connected solar PV systems. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 105(3), 585–594.
- Lucantonio, F., Sosa, J., & Aiello, R. (2022). Energía asequible y sustentable para el Paraguay. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Martínez, F., Morel, T., Fretes, H., Rodas, J., Kali, Y., & Gregor, R. (2020). Model predictive current control of dual-mode voltage source inverter operations: Islanded and grid-connected. In 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC) (pp. 1–6). IEEE.
- Martínez, F., Sanabria-Morel, B. R., Morel-Otazu, T. A., & Pacher, J. (2021). Análisis de filtros activos de potencia para el equilibrio de cargas mediante convertidores de dos y siete niveles de cuatro hilos. *Revista Científica de la UCSA*, 8(1), 68–90.
- Messaoudi, F., Farhani, F., & Zaafouri, A. (2024). A new approach to MPPT hybrid incremental conductance–sliding mode control for PV grid-connected systems. *Measurement and Control*, 57(9), 1370–1382.

- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES). (2022). Requisitos para la obtención de licencias ambientales en Paraguay. <https://www.mades.gov.py>
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC). (2021). Normativas técnicas para proyectos de infraestructura energética en zonas rurales. <https://www.mopc.gov.py>
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2024). Situación de la integración eléctrica en América del Sur. <https://www.olade.org/wp-content/uploads/2024/11/Nota-Tecnica-Integracion-Elctrica-en-America-del-Sur-v11-11-2024.pdf>
- Parque Tecnológico Itaipú-Paraguay & Itaipú Binacional. (2016). Atlas del potencial energético solar y eólico del Paraguay. <https://www.pti.org.py/atlas-solar-eolico>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2023). Desarrollo humano y acceso energético en comunidades rurales. PNUD.
- PVEducation. (s.f.). Battery bank sizing. <https://www.pveducation.org>
- PVEducation. (s.f.). Solar array sizing. <https://www.pveducation.org>
- PVsyst SA. (2023). PVsyst v8.0: Software for photovoltaic system design and simulation. <https://www.pvsyst.com>
- Secretaría Técnica de Planificación (STP). (2023). Guía para la formulación de proyectos de inversión pública con componente energético. <https://www.stp.gov.py>
- S&P Global. (2024). Empresas generadoras de energía en América Latina. <https://www.spglobal.com/assets/documents/ratings/es/pdf/2024/2024-07-29-reporte-sectorial-empresas-generadoras-de-energia-en-america-latina.pdf>
- Viceministerio de Minas y Energía. (2013). Electrificación rural mediante sistemas fotovoltaicos en Paraguay. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones.
- Yang, Y., Yang, Y., Xie, C., Xu, L., Liu, Y., & Shi, H. (2024). A hierarchical energy management strategy for DC microgrid hybrid energy storage systems based on fractional-order sliding mode controller. Journal of Energy Storage, 99, 113307.
- Zucchini, G., González, A., Gregor, R., Pacher, J., & Gonzalez, O. (2025, October). Comparative Evaluation of Delay Compensation in Predictive Power Control for Two and Three Level Inverters in Grid Interconnection Applications. In 2025 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) (pp. 1-6). IEEE.