



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ENÉRGICO DE 8 SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS DE 400W BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE CONSUMO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: DAVID GEAMPIERRE AGUILAR MAYO

GALO XAVIER CASTILLO CHELE

TUTOR: MAG. HOLGER JORGE SANTILLÁN CARRANZA

Guayaquil – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, David Geampierre Aguilar Mayo con documento de identificación N° 0929509628 y Galo Xavier Castillo Chele con documento de identificación N° 0943653642; manifestamos que:

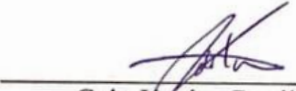
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 01 de agosto del año 2025

Atentamente,



David Geampierre Aguilar Mayo
0929509628



Galo Xavier Castillo Chele
0943653642

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, David Geampierre Aguilar Mayo con documento de identificación No. 0929509628 y Galo Xavier Castillo Chele con documento de identificación No. 0943653642, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Ensayos o Artículos Académicos: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ENÉRGÉTICO DE 8 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE 400W BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE CONSUMO, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniería en Electricidad, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 01 de agosto del año 2025

Atentamente,



David Geampierre Aguilar Mayo
0929509628



Galo Xavier Castillo Chele
0943653642

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Holger Jorge Santillán Carranza con documento de identificación N° 0916303134, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ENÉRGICO DE 8 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE 400W BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE CONSUMO, realizado por David Geampierre Aguilar Mayo con documento de identificación N° 0929509628 y por Galo Xavier Castillo Chele con documento de identificación N° 0943653642, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Ensayos o Artículos Académicos que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 01 de agosto del año 2025

Atentamente,


Mag. Holger Jorge Santillán Carranza
0916303134

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE 8 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE 400W BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE CONSUMO

Galo Castillo C.
Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica Salesiana
Guayaquil, Ecuador

David Aguilar M.
Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica Salesiana
Guayaquil, Ecuador

Holguer Santillan C.
Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica Salesiana
Guayaquil, Ecuador

Abstract— *Este estudio evalúa el rendimiento energético real de ocho sistemas fotovoltaicos aislados de 400 W instalados en viviendas de la comunidad rural Masa II, Ecuador. A pesar de compartir configuraciones técnicas similares, los sistemas presentan variaciones significativas en su eficiencia operativa, atribuibles a factores como el perfil de consumo, las prácticas de mantenimiento y el comportamiento del usuario. Se utilizó el software VictronConnect para registrar la producción energética diaria y PVsyst para modelar el rendimiento ideal bajo condiciones climáticas locales. La comparación entre ambos conjuntos de datos permitió identificar pérdidas energéticas de hasta un 25 %, asociadas principalmente a la falta de mantenimiento preventivo y al uso desalineado con la capacidad del sistema. Los resultados refuerzan la necesidad de un enfoque integral que combine diseño técnico, capacitación continua y estrategias de monitoreo, a fin de garantizar la sostenibilidad operativa de los sistemas fotovoltaicos en comunidades rurales aisladas.*

Keywords— *sistemas fotovoltaicos aislados, monitoreo energético, VictronConnect, PVsyst, consumo energético rural, eficiencia operativa, energía solar off-grid, electrificación rural, mantenimiento de paneles solares, comparación rendimiento real vs simulado.*

I. INTRODUCCIÓN

En zonas rurales aisladas de América Latina, la falta de acceso confiable a la energía eléctrica continúa siendo una de las barreras estructurales más persistentes para el desarrollo integral. Frente a esta problemática, los sistemas fotovoltaicos aislados (SFV) se presentan como una solución viable y sostenible, al permitir la generación autónoma de electricidad mediante la captación de energía solar [1]. Su aplicación ha demostrado ser especialmente útil en contextos de pobreza energética, donde otras alternativas tecnológicas son económicamente inviables o logísticamente limitadas [2].

No obstante, la literatura especializada ha evidenciado una discrepancia frecuente entre el rendimiento teórico estimado de los SFV y su comportamiento real en condiciones de operación. Estas diferencias suelen atribuirse a un conjunto de factores como el mal dimensionamiento, la degradación de componentes, el uso inadecuado por parte del usuario y la falta de mantenimiento [3]. Adicionalmente, elementos como la

irradiancia variable, la acumulación de polvo en los paneles o el aumento de temperatura afectan de manera directa la eficiencia energética del sistema [4].

La comunidad Masa II, ubicada en una zona insular del Ecuador, cuenta con varios sistemas FV instalados bajo esquemas similares de diseño. Sin embargo, a pesar de contar con configuraciones técnicas equivalentes, se han detectado variaciones significativas en los niveles de generación y consumo energético entre las viviendas. Este fenómeno evidencia la necesidad de evaluar, de forma comparativa, el desempeño real de cada sistema y las posibles causas técnicas u operativas que estén afectando su eficiencia.

Este artículo tiene como propósito evaluar el rendimiento energético de ocho sistemas fotovoltaicos aislados en Masa II, estableciendo una comparación entre los valores reales de generación registrados mediante VictronConnect y los valores ideales simulados en PVsyst. El estudio busca, además, identificar las principales causas de pérdida energética, proponer estrategias de mejora y aportar con evidencia técnica útil para futuros proyectos de electrificación rural.

La metodología utilizada incluye el levantamiento de datos técnicos-, la caracterización del perfil de consumo de cada vivienda mediante encuestas, la recopilación de registros históricos de operación, y la simulación de los sistemas en PVsyst. Este enfoque permite construir un diagnóstico integral basado en la correlación entre variables técnicas, ambientales y de uso, lo que resulta clave para optimizar el diseño y sostenibilidad de este tipo de soluciones energéticas.

A. Trabajos Relacionados

En la última década, el despliegue de sistemas fotovoltaicos aislados ha generado un amplio cuerpo de investigación sobre su eficiencia, diseño y sostenibilidad. Lata-García et al. evaluaron un sistema híbrido solar-biomasa-diésel para comunidades rurales del Golfo de Guayaquil, evidenciando que las condiciones climáticas, el mantenimiento y la gestión local influyen decisivamente en el rendimiento [1].

H. Abdulla, A. Sleptchenko, y A. Nayfeh, en una revisión sistemática de operación y mantenimiento en sistemas FV, identificaron que las principales fallas operativas en entornos rurales derivan de la falta de formación del usuario y el descontrol en la gestión de carga [2]. Estos aspectos resultan fundamentales al analizar comunidades como Masa II, donde el perfil de consumo varía significativamente por vivienda.

B. K. Sovacool y R. Stock profundizaron en las desigualdades que pueden surgir incluso entre beneficiarios con tecnologías equivalentes. Su trabajo sostiene que la apropiación comunitaria, el conocimiento técnico y las rutinas de uso son tan determinantes como la calidad del equipamiento para asegurar el acceso justo a la energía [3].

Desde una perspectiva de simulación, Y. Siregar, Y. Hutahuruk, y Suherman, utilizaron PVsyst para optimizar un sistema FV conectado a red en Indonesia, destacando cómo la orientación, inclinación y tipo de panel impactan en la producción anual. Aunque su estudio es urbano, su enfoque metodológico es directamente aplicable a comunidades rurales [5].

M. M. Hasan et al. diseñaron y simularon un sistema FV aislado en una comunidad de Uttar Pradesh, India, empleando HOMER y datos climáticos reales. Su análisis incluyó viabilidad técnica y económica, lo cual aporta un precedente útil para evaluar el desempeño esperado frente al real en entornos similares [6].

N. G. Ajah, C. N. Ugwu, C. Eya, I. Onyegbadue, E. C. Ejiogu, y C. I. Ndukwu, analizaron un sistema mini-grid aislado para electrificación rural en Nigeria, utilizando múltiples herramientas de modelado. Su estudio enfatiza la necesidad de evaluar los sistemas con datos reales de carga y consumo, reforzando la importancia de auditorías energéticas como la que se propone en este trabajo [7].

Z. Shi, F. Liang, y A. Pezzuolo, realizaron un análisis integral sobre las comunidades energéticas rurales, destacando cómo los marcos colaborativos y las estructuras de gobernanza influyen directamente en la sostenibilidad operativa de los sistemas fotovoltaicos [8].

G. G. Dranka propusieron un marco de auditoría energética para sistemas fotovoltaicos rurales, basado en inspecciones in situ y métricas de rendimiento, lo cual refuerza la metodología aplicada en este estudio [9].

Y. Li, W. Zhang, J. Meng, y Y. Zu, realizaron un análisis característico y diseño óptimo de arreglos FV en edificaciones, teniendo en cuenta parámetros ambientales; su enfoque puede ser adaptado a instalaciones rurales como Masa II [10].

M. Eti y M. N. Dinesh evaluaron la gestión energética en sistemas fotovoltaicos aislados mediante el uso del algoritmo MPPT P&O, proporcionando herramientas para optimizar la entrega de energía en entornos de baja disponibilidad [11].

Anuebunwa y Mokryani desarrollaron un modelo de asignación óptima de recursos energéticos en microrredes solares aisladas, demostrando cómo es posible maximizar la cobertura energética en contextos de capacidad limitada [12].

S. Sannigrahi, S. R. Ghatak, y P. Acharjee realizaron una evaluación comparativa del rendimiento de un sistema híbrido renovable con diferentes tecnologías de almacenamiento, destacando el papel que juega la selección del banco de baterías en la eficiencia del sistema [13].

Además, estudios recientes han reforzado la necesidad de considerar impactos sociales, climáticos y de diseño en sistemas aislados. Lata-García et al. analizaron el impacto social, ambiental y económico de la electrificación rural con SFV, concluyendo que la sostenibilidad está fuertemente ligada al contexto local y la gobernanza comunitaria [14].

Por su parte, Jacob y Farzaneh propusieron un modelo híbrido FV-térmico-viento con simulación dinámica, demostrando que la integración tecnológica puede mejorar la resiliencia de microrredes rurales [15].

Kanchwala et al. desarrollaron un sistema fotovoltaico autónomo para zonas rurales en India, modelado en HOMER, donde se destaca la importancia de optimizar el diseño según la carga local y las condiciones ambientales [16].

Dey et al. realizaron un análisis tecno-económico en sistemas híbridos aislados, identificando que la selección del almacenamiento es clave para la viabilidad económica a largo plazo [17].

Finalmente, Ghodusinejad et al. propusieron un modelo multicriterio para evaluar el rendimiento de sistemas FV en distintos climas, lo cual es relevante para comunidades como Masa II, donde los factores ambientales varían considerablemente [18].

II. METODOLOGÍA

La hipótesis principal plantea que: “Existen discrepancias significativas entre el rendimiento real de los sistemas fotovoltaicos y su rendimiento teórico, atribuibles a diferencias en el perfil de consumo, mantenimiento, comportamiento del usuario y condiciones ambientales.” El alcance de este estudio comprende tanto el análisis técnico como el perfil de uso energético de cada vivienda.

Para asegurar la reproducibilidad, se documentará detalladamente el procedimiento de captura de datos con la app VictronConnect, el diseño simulado en PVsyst, y se incluirá un flujograma de actividades. Los resultados podrán ser replicables en otras comunidades rurales con sistemas similares. Los archivos de simulación y la base de datos de campo podrán ser compartidos bajo solicitud académica.

A. Materiales y herramientas.

Las herramientas empleadas en este estudio fueron seleccionadas con el fin de garantizar una evaluación precisa del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos. Se utilizó la aplicación VictronConnect, la cual permite la descarga directa del historial de producción, carga y descarga del controlador MPPT Victron SmartSolar 75/15 instalado en cada vivienda.

Asimismo, se empleó el software PVsyst para modelar y simular el rendimiento ideal de los sistemas bajo condiciones climáticas locales, considerando los parámetros técnicos levantados en campo. Esta herramienta permitió establecer una línea base teórica contra la cual comparar los datos reales obtenidos.

Con el objetivo de caracterizar el perfil de consumo de los usuarios, se aplicaron encuestas estructuradas que permitieron identificar la carga conectada, los horarios de uso y las prácticas de consumo habituales. Esta información fue esencial para correlacionar los hábitos energéticos con el desempeño del sistema.

Además, se revisaron fichas técnicas de los componentes principales paneles solares, controladores, bancos de baterías e inversores, las cuales fueron obtenidas durante las visitas de inspección. Estas fichas complementaron la validación técnica realizada en campo.

Todas las viviendas evaluadas presentan una configuración común, compuesta por un módulo fotovoltaico, un controlador de carga tipo MPPT, un banco de baterías y un inversor. La verificación in situ de esta configuración permitió asegurar la consistencia de los datos analizados y garantizar la comparabilidad entre casos.

B. Procedimiento

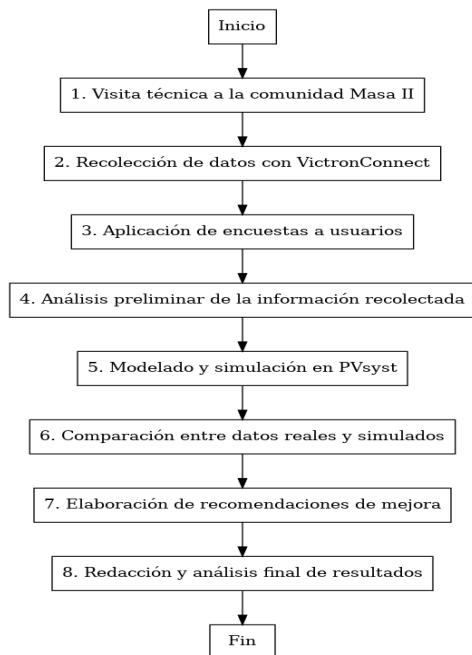


Fig.1 Diagrama de flujo del procedimiento.

Se realizó una visita técnica a la comunidad Masa II. Mediante la aplicación VictronConnect se extrajo el historial de producción energética de cada sistema en intervalos diarios. Simultáneamente, se aplicó una encuesta estructurada al usuario para caracterizar su perfil de consumo energético.

Con base en los datos recolectados (ubicación, inclinación del panel, orientación, tipo de módulo y carga diaria promedio), se modeló en PVsyst cada uno de los sistemas para obtener el rendimiento ideal anual, considerando pérdidas térmicas y eléctricas.

Se compararon los resultados reales con los simulados en términos de kWh/año, eficiencia del sistema, pérdidas operativas, y desviaciones relativas. Esta comparación permitió identificar causas técnicas y de uso que afectan el rendimiento.

La población objetivo está compuesta por las viviendas beneficiarias del proyecto de electrificación fotovoltaica en Masa II. Se eligieron ocho viviendas con sistemas FV funcionales y características técnicas similares. El criterio de inclusión fue contar con acceso al historial completo del controlador Victron y la disposición del usuario para colaborar en la encuesta. Se excluyeron sistemas inoperativos o sin acceso a los datos internos del MPPT.

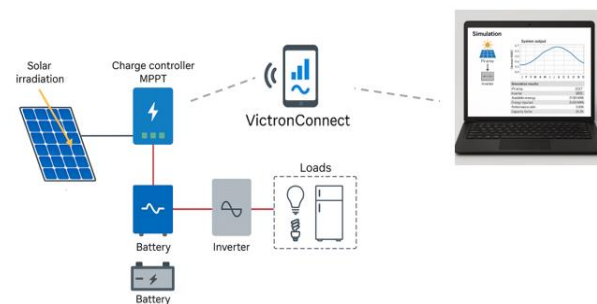


Fig.2 Prototipo de investigación

El prototipo representado en Fig. 2 ilustra el funcionamiento general de un sistema fotovoltaico aislado típico, como los instalados en la comunidad Masa II. Este sistema se compone de un conjunto de elementos interconectados que permiten la captación, conversión, almacenamiento y utilización de la energía solar para cubrir las necesidades energéticas básicas de una vivienda rural.

El proceso se inicia con la captación de irradiación solar mediante un módulo fotovoltaico, el cual transforma la energía solar en corriente continua. Esta energía es regulada por un controlador de carga MPPT, cuya función principal es optimizar la transferencia de energía desde el panel hacia el banco de baterías, asegurando que el sistema opere en el punto de máxima eficiencia de generación.

El banco de baterías almacena la energía para su uso durante la noche o en periodos sin irradiación suficiente. Posteriormente, un inversor convierte la corriente continua almacenada en corriente alterna, necesaria para alimentar los electrodomésticos convencionales conectados a la red interna de la vivienda, como iluminación, refrigeración o equipos de comunicación.

El sistema incorpora además un módulo de monitoreo a través de la aplicación móvil VictronConnect, que permite acceder al historial operativo del controlador MPPT. Esta herramienta facilita la descarga de datos técnicos diarios sobre producción, estado de carga, descarga y consumo energético, los cuales son fundamentales para el análisis del comportamiento real del sistema en campo.

Finalmente, la simulación del sistema ideal se realiza en el software PVsyst, considerando las condiciones climáticas locales y los parámetros técnicos específicos de cada instalación. Esta simulación permite generar una línea base teórica de rendimiento, la cual se compara con los datos reales obtenidos a través de VictronConnect. Esta correlación constituye el núcleo del análisis técnico del estudio, permitiendo calcular la eficiencia del sistema, identificar pérdidas operativas y proponer recomendaciones de mejora específicas para cada vivienda evaluada.

III. RESULTADOS

A. Energía generada y consumida

TABLE I. DATOS REALES DE ENERGÍA GENERADA Y CONSUMIDA.

Vivienda	DATOS GENERALES		
	Energía Generada (kWh)	Energía Consumida (kWh)	Eficiencia del Sistema (%)
1	30,79	25,74	83,60

Vivienda	DATOS GENERALES		
	Energía Generada (kWh)	Energía Consumida (kWh)	Eficiencia del Sistema (%)
2	27,02	21,63	80,05
3	21,42	17,33	80,91
4	13,94	11,32	81,21
5	34,34	26,02	75,77
6	27,31	21,59	79,06
7	28,04	22,68	80,88
8	52,93	44,53	84,13

La Tabla 1. presenta un resumen consolidado de la energía eléctrica generada y consumida en las ocho viviendas intervenidas de la comunidad Masa II, durante el período comprendido entre el 10 de abril y el 10 de mayo de 2025. Los datos fueron obtenidos mediante la descarga diaria de registros históricos desde el software VictronConnect, utilizando los controladores SmartSolar MPPT instalados en cada vivienda.

Cada valor corresponde a la sumatoria diaria de la energía generada por el sistema fotovoltaico y la energía efectivamente utilizada por las cargas durante los 31 días del periodo evaluado. Posteriormente, estos valores fueron normalizados y expresados en kilovatios-hora (kWh) para permitir su análisis comparativo.

La eficiencia del sistema en cada vivienda fue calculada como el cociente entre la energía consumida y la energía generada, multiplicado por 100. Esta métrica refleja el grado de aprovechamiento del recurso fotovoltaico disponible, considerando tanto el comportamiento de los usuarios como la capacidad del sistema para almacenar o entregar energía en función de la demanda real.

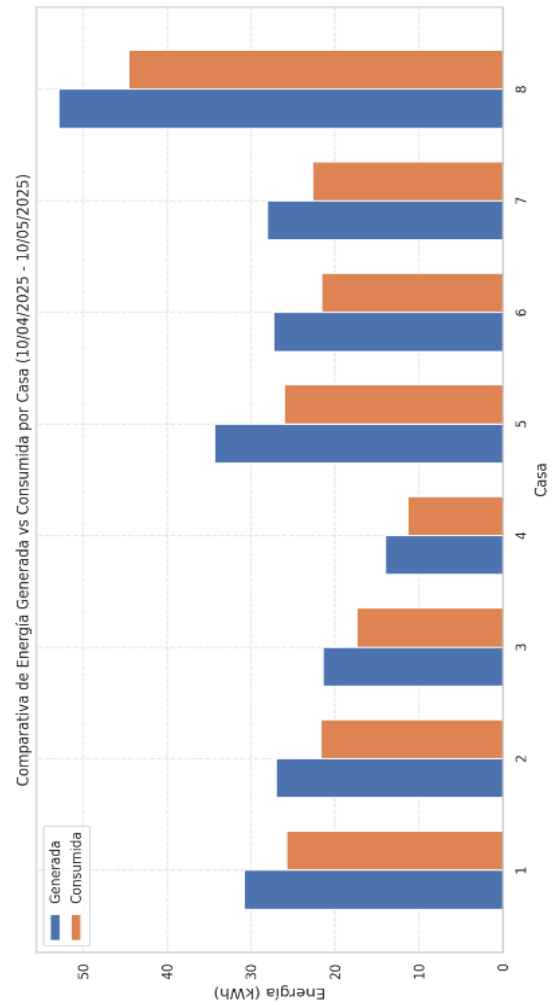


Fig. 3 Comparativa energía generada vs energía consumida

La Figura 3 presenta una comparación gráfica entre la energía generada y consumida por cada una de las ocho viviendas monitoreadas durante el período comprendido entre el 10 de abril y el 10 de mayo de 2025. Este análisis permite visualizar las diferencias de producción y demanda energética por vivienda, así como identificar posibles desequilibrios entre generación y uso real de la energía.

B. Rendimiento real vs simulado

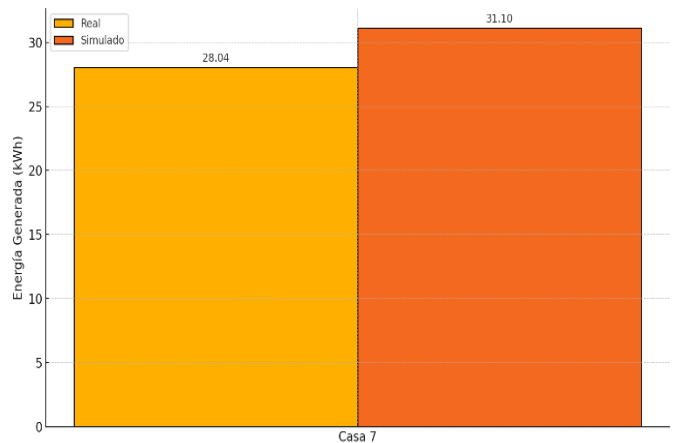


Fig.4 Diagrama de barras energía real y simulada vivienda 7

Este apartado presenta una comparación directa entre la energía generada medida experimentalmente (real) y los valores de energía generada obtenidos mediante simulación en el software PVsyst. Para este análisis, se tomó como referencia la vivienda 7, ya que se contó con ambos conjuntos de datos durante el mismo período de observación comprendido entre el 10 de abril de 2025 y el 10 de mayo de 2025.

La **Tabla 2** resume los valores de energía generada (en kWh) obtenidos a partir de los registros del MPPT VictronConnect y los resultados proporcionados por la simulación realizada en PVsyst bajo condiciones climáticas locales y con una configuración equivalente del sistema fotovoltaico.

TABLE II. CONFIGURACIÓN EQUIVALENTE DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

DATOS GENERALES	
Parámetro	Valor (kWh)
Energía generada Real	28,04
Energía generada Simulada (PVsyst)	31,1
Diferencia Absoluta	3,06
Porcentaje de diferencia	9,84%

Tabla 2. Equivalente del sistema fotovoltaico.

La diferencia observada en la **Tabla 2** representa una variación del 9,84 % respecto al valor estimado por simulación. Esta discrepancia refleja las limitaciones inherentes al modelo computacional al intentar replicar las condiciones reales de operación del sistema fotovoltaico.

Entre los factores que podrían explicar esta diferencia se incluyen variaciones atmosféricas no consideradas por el software, como la presencia de polvo, nubosidad intermitente o sombreados parciales que reducen la irradiancia efectiva.

Asimismo, se deben considerar posibles desviaciones en la inclinación real de los módulos y en la irradiancia incidente frente a los valores asumidos durante la simulación. También influye la degradación progresiva de los paneles y pérdidas térmicas adicionales.

Adicionalmente, podrían haberse producido desconexiones momentáneas del sistema, así como limitaciones operativas debido a condiciones de sobrecarga. Estas causas se abordarán con mayor profundidad en el Capítulo 4, correspondiente a la discusión.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de la evaluación de los sistemas fotovoltaicos aislados en la comunidad Masa II permiten constatar una marcada variabilidad en el rendimiento energético, a pesar de contar con configuraciones técnicas homogéneas. Esta heterogeneidad se refleja en las diferencias sustanciales de energía generada entre viviendas, como en el caso de la Casa 4 (13,94 kWh) frente a la Casa 8 (52,93 kWh), en un mismo intervalo de observación. Tales contrastes revelan que, más allá del diseño

estandarizado, factores operativos y conductuales tienen un peso significativo en la eficiencia del sistema [14].

El análisis comparativo entre los valores reales y simulados evidenció una desviación del 9,84 % en la vivienda 7, lo que confirma la presencia de pérdidas no consideradas por el modelo teórico. Esta discrepancia puede atribuirse a la acumulación de polvo, obstrucciones parciales, orientación inadecuada de los paneles o desconexiones momentáneas del sistema, como se ha observado también en sistemas instalados en regiones costeras de Brasil, donde el ambiente húmedo y la salinidad afectan progresivamente la eficiencia operativa [19].

En estudios recientes, se ha demostrado que la incorporación de elementos de gestión térmica, como disipadores con aletas y enfriamiento termoeléctrico, puede mejorar significativamente el rendimiento energético de los módulos fotovoltaicos en climas cálidos, lo que podría representar una estrategia complementaria en zonas como Masa II [20].

Con relación al consumo, los datos recolectados muestran que en todas las viviendas el mayor uso energético se concentra entre las 18h00 y las 24h00, cuando no hay disponibilidad de generación solar y el sistema depende completamente del banco de baterías. Esta concentración horaria impone profundidades de descarga elevadas, acortando la vida útil de las baterías, tal como lo advierte Sannigrahi et al. respecto al impacto de las tecnologías de almacenamiento [13]. Este patrón se repite incluso en viviendas con cargas reducidas, como la Casa 7, y se agrava en aquellas con televisores y parlantes de alta demanda nocturna, como la Casa 8.

Desde el punto de vista social, el componente humano emerge como una variable crítica. A pesar de contar con condiciones ambientales similares (sin sombra y con paneles montados en postes), el rendimiento real varía considerablemente. Esto respalda la hipótesis de que el nivel de apropiación, gestión de carga y compromiso del usuario con el mantenimiento son determinantes clave para lograr un desempeño eficiente del sistema [3], [8], [14].

Aunque PVsyst es una herramienta ampliamente validada para simulaciones, se han desarrollado algoritmos MPPT híbridos más eficientes, basados en métodos de gradiente conjugado, que permiten optimizar la captación energética bajo condiciones variables [21].

Asimismo, investigaciones sobre modelos predictivos de corto plazo han resaltado que variables meteorológicas y temporales pueden mejorar la gestión preventiva de los sistemas FV, optimizando su confiabilidad en tiempo real [22], [23].

Recientemente, se ha propuesto el uso de modelos de aprendizaje profundo explicables para evaluar el desempeño de sistemas FV conectados a red, lo cual representa un enfoque prometedor para futuras aplicaciones en sistemas rurales off-grid [24].

Finalmente, los hallazgos sugieren que una estrategia exclusivamente técnica resulta insuficiente. Se requiere un enfoque integral que combine el monitoreo sistemático del sistema, la capacitación continua de los usuarios y mecanismos de mantenimiento preventivo adaptados al entorno rural. La inclusión de estas dimensiones permitirá acortar la brecha entre el rendimiento teórico y el observado, incrementando la sostenibilidad operativa y el impacto social de los sistemas fotovoltaicos rurales [1], [15], [17].

V. CONCLUSIONES

La evaluación de los sistemas fotovoltaicos instalados en la comunidad Masa II permitió evidenciar una brecha considerable entre el rendimiento real y el desempeño ideal proyectado bajo condiciones simuladas. Esta discrepancia, detectada a través del análisis comparativo entre los datos obtenidos mediante monitoreo in situ y las proyecciones generadas con software especializado, pone de manifiesto la influencia determinante de factores operativos y de comportamiento del usuario sobre la eficiencia del sistema.

Los resultados muestran que, en varios de los casos analizados, la producción energética efectiva no supera el 90 % del potencial estimado, lo que implica una pérdida acumulativa de energía útil. Estas diferencias se atribuyen, principalmente, a la ausencia de prácticas de mantenimiento preventivo, como la limpieza regular de los paneles, así como a perfiles de consumo que no están alineados con las capacidades del sistema, generando ciclos profundos de descarga y reduciendo la vida útil del banco de baterías.

A pesar de que todos los usuarios reportaron haber recibido formación técnica inicial, se identificó una falta de apropiación operativa del sistema. No se han implementado rutinas de inspección ni acciones correctivas, y tampoco existe un mecanismo de seguimiento que permita detectar desviaciones en el rendimiento a tiempo. Esta situación debilita la sostenibilidad de la solución energética implementada y compromete su eficacia en el mediano y largo plazo.

Frente a estos hallazgos, se recomienda diseñar un programa comunitario de mantenimiento con cronogramas definidos y responsabilidades compartidas. Además, es fundamental reforzar la capacitación técnica, orientándola a prácticas concretas y repetitivas que aseguren una gestión adecuada del sistema por parte del usuario final. La incorporación de sistemas de monitoreo remoto también se plantea como una estrategia efectiva para alertar sobre fallas o condiciones anómalas sin depender exclusivamente de la supervisión presencial.

Esta investigación confirma la necesidad de un enfoque integral para la implementación de sistemas fotovoltaicos rurales, en el cual el componente social, el acompañamiento técnico y la adaptación continua sean considerados tan relevantes como el diseño eléctrico. A partir de esta experiencia, se sientan las bases para futuras intervenciones más robustas, escalables y orientadas a garantizar no solo el acceso a la energía, sino también su uso eficiente, justo y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] J. Lata-García, N. Zamora Cedeño, G. Ampuño, F. Jurado, M. L. Swarupa, y W. Maliza, "Optimization and Evaluation of a Stand-Alone Hybrid System Consisting of Solar Panels, Biomass, Diesel Generator, and Battery Bank for Rural Communities", *Sustainability 2024, Vol. 16, Page* 9012, vol. 16, núm. 20, p. 9012, oct. 2024, [doi: 10.3390/SU16209012](https://doi.org/10.3390/SU16209012).
- [2] H. Abdulla, A. Sleptchenko, y A. Nayfeh, "Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 195, p. 114342, may 2024, [doi: 10.1016/J.RSER.2024.114342](https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.114342).
- [3] B. K. Sovacool y R. Stock, "'We struggle to survive': Exploring the whole systems energy injustices of solar photovoltaics in India", *The Electricity Journal*, vol. 37, núm. 6, p. 107426, jul. 2024, [doi: 10.1016/J.TEJ.2024.107426](https://doi.org/10.1016/J.TEJ.2024.107426).
- [4] M. Rumbayan, J. Kindangen, A. Sambul, S. Sompie, y J. Cross, "Solar energy implementation in rural communities and its contributions to SDGs: A systematic literature review", *Unconventional Resources*, vol. 6, p. 100180, abr. 2025, [doi: 10.1016/J.UNCRE.2025.100180](https://doi.org/10.1016/J.UNCRE.2025.100180).
- [5] Y. Siregar, Y. Hutahuruk, y Suherman, "Optimization design and simulating solar PV system using PVSyst software", *2020 4th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering, ELTICOM 2020 - Proceedings*, pp. 219–223, sep. 2020, [doi: 10.1109/ELTICOM50775.2020.9230474](https://doi.org/10.1109/ELTICOM50775.2020.9230474).
- [6] M. M. Hasan *et al.*, "Harnessing Solar Power: A Review of Photovoltaic Innovations, Solar Thermal Systems, and the Dawn of Energy Storage Solutions", *Energies 2023, Vol. 16, Page 6456*, vol. 16, núm. 18, p. 6456, sep. 2023, [doi: 10.3390/EN16186456](https://doi.org/10.3390/EN16186456).
- [7] N. G. Ajah, C. N. Ugwu, C. Eya, I. Onyegbadue, E. C. Ejiogu, y C. I. Ndukwu, "Analysis and Evaluation of an Off-Grid Mini-Grid PV System for Rural Electrification", *2024 IEEE International Conference on Advanced Power Engineering and Energy: Empowering Advanced Power Engineering and Energy, APEE 2024*, pp. 176–181, 2024, [doi: 10.1109/APEE60256.2024.10790915](https://doi.org/10.1109/APEE60256.2024.10790915).
- [8] Z. Shi, F. Liang, y A. Pezzuolo, "Renewable energy communities in rural areas: A comprehensive overview of current development, challenges, and emerging trends", *J Clean Prod*, vol. 484, p. 144336, dic. 2024, [doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2024.144336](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144336).
- [9] G. G. Dranka *et al.*, "A comprehensive audit framework for rural photovoltaic systems: On-site insights and key findings from Brazil", *Energy*, vol. 322, p. 135436, may 2025, [doi: 10.1016/J.ENERGY.2025.135436](https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.135436).
- [10] Y. Li, W. Zhang, J. Meng, y Y. Zu, "Characteristic Analysis and Optimal Design of Building Photovoltaic Array Based on Model Analysis", *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2023, [doi: 10.1109/IECON51785.2023.10311904](https://doi.org/10.1109/IECON51785.2023.10311904).
- [11] M. Eti y M. N. Dinesh, "Energy Management in Off-Grid PV Battery System with P&O MPPT", *3rd Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology, ODICON 2024*, 2024, [doi: 10.1109/ODICON62106.2024.10797534](https://doi.org/10.1109/ODICON62106.2024.10797534).

- [12] U. Anuebunwa y G. Mokyra, "Optimal energy resource allocation in isolated micro grid with limited supply capacity", *SEST 2021 - 4th International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, sep. 2021, doi: [10.1109/SEST50973.2021.9543449](https://doi.org/10.1109/SEST50973.2021.9543449).
- [13] S. Sannigrahi, S. R. Ghatak, y P. Acharjee, "Performance Evaluation of a Hybrid Renewable Energy System with Different Storage Technologies for an off-grid Rural Household", *Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives, and Energy Systems for Industrial Growth, PEDES*, núm. 2024, 2024, doi: [10.1109/PEDES61459.2024.10961067](https://doi.org/10.1109/PEDES61459.2024.10961067).
- [14] J. Lata-García, L. Flores-Bastidas, P. P. Rosero, y F. Jurado, "Social, Environmental and Techno-Economic Impact of Rural Electrification Isolated with Photovoltaic Systems", *Revista de Gestão - RGSA*, vol. 18, núm. 2, p. e5368, may 2024, doi: [10.24857/rgsa.v18n2-124](https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-124).
- [15] E. Jacob y H. Farzaneh, "Modeling and performance evaluation of hybrid photovoltaic thermal, wind, and battery microgrids using optimization and dynamic simulation", *Scientific Reports 2025 15:1*, vol. 15, núm. 1, pp. 1–27, abr. 2025, doi: [10.1038/s41598-025-95149-w](https://doi.org/10.1038/s41598-025-95149-w).
- [16] K. Fettah *et al.*, "Optimal integration of photovoltaic sources and capacitor banks considering irradiance, temperature, and load changes in electric distribution system", *Scientific Reports 2025 15:1*, vol. 15, núm. 1, pp. 1–24, ene. 2025, doi: [10.1038/s41598-025-85484-3](https://doi.org/10.1038/s41598-025-85484-3).
- [17] P. Dey *et al.*, "Design Optimization and Techno-Economic Analysis of Off-Grid Hybrid Energy Systems for Sustainable Rural Electrification in Bangladesh", *Proceedings of 2024 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering, WIECON-ECE 2024*, pp. 53–58, 2024, doi: [10.1109/WIECON-ECE64149.2024.10915104](https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE64149.2024.10915104).
- [18] M. Hasan Ghodusinejad, A. Ghodrati, R. Zahedi, y H. Yousefi, "Multi-criteria modeling and assessment of PV system performance in different climate areas of Iran", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102520, oct. 2022, doi: [10.1016/J.SETA.2022.102520](https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102520).
- [19] J. De Oliveira Gonzalez y F. Ramos Martins, "Performance study of a photovoltaic system operating on the southeastern coast of Brazil", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 22, núm. 5, pp. 410–417, may 2024, doi: [10.1109/TLA.2024.10500721](https://doi.org/10.1109/TLA.2024.10500721).
- [20] H. Farzan, M. E. Kazemian, y M. Mahmoudi, "Comparative Study on Electrical Performance of Photovoltaic Panels Integrated with Thermoelectric Coolers and Finned Heat Sinks: An Experimental Study", *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 39, núm. 4, pp. 925–935, abr. 2026, doi: [10.5829/IJE.2025.39.04A.11](https://doi.org/10.5829/IJE.2025.39.04A.11).
- [21] W. Jinpeng, Y. Qinxue, Z. Bo, Jeremy-Gillbanks, y Z. Xin, "Study on MPPT Algorithm Based on an Efficient Hybrid Conjugate Gradient Method in a Photovoltaic System", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 4219–4227, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3233826](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3233826).
- [22] G. Nassreddine, A. El Arid, M. Nassereddine, O. Al-Khatib, A. Arram, y A. El Abed, "Enhancing the Efficacy of Short-Term Prediction Models for Solar Photovoltaic Systems: An Influence Examination of Chronological and Meteorological Factors", *IEEE Access*, vol. 13, pp. 66787–66808, 2025, doi: [10.1109/ACCESS.2025.3559587](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3559587).
- [23] I. Hassan *et al.*, "Explainable Deep Learning Model for Grid-Connected Photovoltaic System Performance Assessment for Improving System Reliability", *IEEE Access*, vol. 12, pp. 120729–120746, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3452778](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3452778).
- [24] G. G. Kim, J. H. Hyun, J. H. Choi, S. H. Ahn, B. G. Bhang, y H. K. Ahn, "Quality Analysis of Photovoltaic System Using Descriptive Statistics of Power Performance Index", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 28427–28438, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3257373](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3257373).