

Rehabilitation of a solar energy system in indigenous territory through community power

Gustavo Richmond-Navarro¹; Daniel Alejandro Jiménez Agüero²; José Miguel Sánchez-De-La-Hoz³; Diana Segura-Sojo⁴; Carlos Mauricio Segura Quirós⁵

^{1,2,4,5}Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, gritchmond@tec.ac.cr, djimenex@estudiantec.cr, disegura@tec.ac.cr, Csegura@tec.ac.cr

³University of Atlantico, Colombia, jmiguelssanchez@mail.uniatlantico.edu.co

Abstract– This study presents the rehabilitation of an off-grid photovoltaic system in an Indigenous educational center in Costa Rica, integrating technical recovery with a Community Power approach. The objective was to restore system functionality while strengthening local capacity for operation and management. The methodology combined system diagnosis, selective replacement of critical components (including batteries and charge controller), partial reconstruction of the internal electrical network, and a structured community training process. Results show that the system was successfully restored with a total investment of USD 12,200, achieving stable operation under real conditions over a three-month monitoring period. System performance was optimized through load management strategies, such as non-simultaneous use, allowing adaptation to reduced storage capacity (12 batteries instead of the original 16). Operational data confirmed stable voltage and demand patterns within defined limits. Additionally, community members actively participated in monitoring and operation, reducing reliance on external technical support. The main contribution of this study is empirical evidence that rehabilitating off-grid solar systems—combined with community-based management—constitutes a technically viable, cost-effective, and socially sustainable alternative to full system replacement in rural and Indigenous contexts. The findings highlight community empowerment as a critical factor for long-term system sustainability.

Keywords– Photovoltaic solar energy; rural electrification; off-grid systems; community power; indigenous territories.

Rehabilitación de un sistema de energía solar en territorio indígena mediante empoderamiento comunitario

Gustavo Richmond-Navarro¹; Daniel Alejandro Jiménez Agüero²; José Miguel Sánchez-De-La-Hoz³; Diana Segura-Sojo⁴; Carlos Mauricio Segura Quirós⁵

^{1,2,4,5}Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, grrichmond@tec.ac.cr, djimenex@estudiantec.cr, diseadura@tec.ac.cr, Csegura@tec.ac.cr

³University of Atlantico, Colombia, jmiguelssanchez@mail.uniatlantico.edu.co

Resumen— Este estudio presenta la rehabilitación de un sistema fotovoltaico aislado en un centro educativo indígena en Costa Rica, integrando la recuperación técnica con un enfoque de Community Power. El objetivo fue restablecer la funcionalidad del sistema y fortalecer las capacidades locales para su operación y gestión. La metodología incluyó el diagnóstico integral del sistema, la sustitución selectiva de componentes críticos (baterías y controlador de carga), la reconstrucción parcial de la red eléctrica interna y un proceso estructurado de capacitación comunitaria. Los resultados evidencian que el sistema fue rehabilitado exitosamente con una inversión total de USD 12 200, logrando una operación estable bajo condiciones reales durante un periodo de monitoreo de tres meses. El desempeño se optimizó mediante estrategias de gestión de carga, como el uso no simultáneo, permitiendo adaptarse a una capacidad reducida de almacenamiento (12 baterías en lugar de 16). Los datos operativos confirmaron patrones estables de tensión y demanda dentro de los límites definidos. Asimismo, la participación activa de la comunidad en el monitoreo y operación redujo la dependencia de soporte técnico externo. Como contribución principal, el estudio aporta evidencia empírica de que la rehabilitación de sistemas solares aislados, combinada con esquemas de gestión comunitaria, es una alternativa técnicamente viable, costo-efectiva y socialmente sostenible frente a la sustitución completa en contextos rurales e indígenas. Los resultados destacan el empoderamiento comunitario como un factor crítico para la sostenibilidad a largo plazo.

Palabras clave— Energía solar fotovoltaica; electrificación rural; sistemas off-grid; empoderamiento comunitario; territorios indígenas.

I. INTRODUCCIÓN

Costa Rica es un país que destaca a nivel internacional por características sobresalientes en materia de alfabetización y cobertura del servicio eléctrico. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el 95,1 % de las personas entre 5 y 18 años asisten a la educación formal [1]. De manera similar, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) reporta que el 99,4 % de la población nacional cuenta con acceso a electricidad [2]. Estos indicadores posicionan al país como un referente regional en términos de desarrollo humano y acceso a servicios básicos.

No obstante, persisten espacios territoriales donde el sistema eléctrico nacional aún no ha llegado. Estas zonas suelen

corresponder a regiones extensas, de baja densidad poblacional y difícil acceso, donde la construcción de infraestructura convencional implica inversiones elevadas y complejidades logísticas significativas. Aun así, desde 2023 el ICE impulsa un programa de electrificación rural con el objetivo de que Costa Rica se convierta en el primer país de América en alcanzar el 100 % de cobertura eléctrica [2].

En el marco de esta estrategia, el Estado ha optado por la instalación de sistemas solares fotovoltaicos aislados de la red (off-grid) para viviendas y centros educativos ubicados en territorios remotos [3]. Sin embargo, diversos proyectos han evidenciado que una fracción de estos sistemas entra en desuso pocos años después de su instalación, principalmente debido a dificultades asociadas a la operación, el mantenimiento y la gestión en contextos rurales o aislados. Esta situación no es exclusiva de Costa Rica, sino que responde a un patrón ampliamente documentado a escala global.

Estudios realizados en América Latina, África Subsahariana y Asia coinciden en que los sistemas off-grid basados en energías renovables han sido fundamentales para ampliar el acceso a la electricidad en zonas donde la extensión de red resulta técnica o económicamente inviable [4], [5], [6]. No obstante, la literatura también documenta que una proporción significativa de estos sistemas presenta fallas operativas recurrentes o es abandonada prematuramente, principalmente por problemas relacionados con el almacenamiento de energía, la electrónica de potencia y la ausencia de esquemas formales de operación y mantenimiento [7], [8], [9], [10].

Ante este panorama, se han propuesto diversas estrategias para enfrentar dichas limitaciones, entre ellas el diseño de sistemas robustos, simples y adaptados al contexto local, así como la optimización del dimensionamiento y la operación de sistemas híbridos con el fin de reducir fallas técnicas y costos operativos [11], [12], [13]. De manera complementaria, múltiples estudios subrayan que la rehabilitación técnica de sistemas abandonados —mediante diagnóstico detallado, reemplazo selectivo de componentes críticos y mejora de las rutinas de operación y mantenimiento— suele ser más costo-

efectiva que la reinstalación completa de nuevas infraestructuras [6], [9].

Desde una perspectiva socio-técnica, la evidencia acumulada resalta que la transferencia de capacidades locales, la participación comunitaria activa y la existencia de modelos de gobernanza adecuados son condiciones necesarias para evitar el abandono de los sistemas y garantizar la continuidad del servicio eléctrico [7], [10], [14], [15]. En este sentido, el concepto de Community Power ha cobrado especial relevancia, al plantear esquemas donde las comunidades no solo son usuarias finales, sino también actores centrales en la gestión, operación y sostenibilidad de los sistemas energéticos [4], [10].

Un análisis comparativo entre América Latina y África Subsahariana revela paralelismos claros, pero también diferencias relevantes. En ambos contextos se reportan fallas recurrentes en baterías, escasez de repuestos, dependencia de técnicos externos y limitada capacitación local [4], [6], [16]. Sin embargo, mientras que en América Latina predominan esquemas públicos o comunitarios con resultados heterogéneos, en África Oriental se ha documentado una fuerte penetración de modelos privados que, si bien amplían el acceso inicial, generan formas de inclusión precaria basadas en endeudamiento, bloqueo remoto de sistemas y ausencia de estrategias de rehabilitación comunitaria [10], [16]. Esta comparación refuerza la necesidad de comprender la electrificación rural no solo como un desafío técnico o financiero, sino como un proceso socio-institucional que requiere apropiación local, capacidades de intervención y reglas claras de uso y mantenimiento.

En conjunto, la literatura coincide en que la sostenibilidad de los sistemas solares aislados depende críticamente del empoderamiento de las comunidades y del fortalecimiento de capacidades técnicas, organizativas y de gestión [4], [7], [14], [15]. Los estudios muestran que los proyectos con participación comunitaria efectiva, capacitación estructurada y modelos de gestión local presentan mayores tasas de funcionamiento a largo plazo, independientemente de la región analizada. Este cuerpo de evidencia respalda enfoques que priorizan la rehabilitación de sistemas existentes, el ajuste del diseño técnico a contextos de recursos limitados y la formación de personas usuarias capaces de comprender los límites y capacidades reales de los sistemas, en línea con experiencias recientes de electrificación rural y aplicación de ASETs (Tecnologías de Energía Sostenible Apropiadas) en territorios indígenas de Costa Rica [5].

Con este panorama, el objetivo de este artículo es presentar el proceso de rehabilitación de un sistema de energía solar fotovoltaica en un centro educativo off-grid. El estudio describe cómo dicho proceso incorporó principios de Community Power y analiza la adaptación del diseño técnico del sistema, en particular el dimensionamiento, en un contexto de recursos limitados, priorizando la capacitación de las personas usuarias para que comprendan los límites de uso y las capacidades reales de la instalación.

Finalmente, se presentan los resultados del sistema rehabilitado, incluyendo su desempeño, demanda y funcionamiento bajo condiciones reales de operación, aportando evidencia empírica que continúa siendo escasa en la literatura científica sobre electrificación rural y sistemas de energía solar aislados.

II. METODOLOGÍA

La metodología se estructuró en tres componentes interrelacionados: (A) la rehabilitación técnica del sistema solar fotovoltaico y de la red eléctrica asociada, (B) la capacitación y el empoderamiento comunitario como eje socio-técnico del proceso y (C) la evaluación del desempeño del sistema una vez puesto en operación. Este enfoque permitió abordar la rehabilitación no solo desde una perspectiva técnica, sino también organizativa y comunitaria.

A. Rehabilitación del sistema solar fotovoltaico

En el centro educativo en cuestión, se instaló en 2020 un sistema de energía solar fotovoltaica, el cual operó por un corto tiempo y salió de operación. Para su rehabilitación, el primer paso consistió en la activación del proceso de comunicación por parte de las personas responsables del sistema, en este caso la dirección del centro educativo, quienes identificaron la necesidad de asistencia técnica y gestionaron, mediante distintos canales institucionales y externos, la solicitud de apoyo. Este paso es crítico en territorios indígenas aislados, donde el acceso a técnicos especializados no se ha garantizado de manera inmediata ni evidente, y donde las distancias, la dispersión poblacional y las limitaciones de acceso a la conectividad representan barreras significativas. Adicionalmente la lengua materna de la comunidad es diferente al español, lo que complejiza la comunicación entre las instituciones y el pueblo.

Ante la imposibilidad de obtener una visita técnica por los canales institucionales tradicionales, se procedió a un segundo paso basado en la articulación de redes de apoyo interinstitucionales. La necesidad fue comunicada a organizaciones externas, lo que permitió que la problemática llegara a una universidad pública, la cual activó sus mecanismos internos para brindar atención técnica.

El tercer paso correspondió a la visita técnica inicial, durante la cual se realizó un diagnóstico integral del sistema. Este diagnóstico incluyó la evaluación tanto del sistema de generación de energía solar fotovoltaica como de la red de distribución eléctrica interna del centro educativo, la cual presentaba un deterioro significativo. Se consideró indispensable evaluar ambos subsistemas de manera conjunta para garantizar condiciones adecuadas de seguridad y operación.

En el marco del tercer paso, resulta crucial para las instituciones y los territorios indígenas, que las autoridades locales sean las que realicen formalmente la invitación a terceras personas para ingresar al territorio y desarrollar actividades técnicas, ya que esto no solo respeta los

mecanismos de autonomía propios de la comunidad, sino que también permite a la institución construir una relación de confianza, legitimidad y condiciones adecuadas para el trabajo colaborativo. Este procedimiento permitió que la visita técnica se desarrollara de manera coordinada con las personas usuarias del sistema, facilitando el acceso a la información relevante y promoviendo una relación de respeto mutuo entre los actores externos y la comunidad.

Un cuarto paso consistió en la definición del alcance de la rehabilitación y la cotización de los trabajos, diferenciando entre los componentes del sistema de energía solar (baterías, inversor y controlador de carga) y la red eléctrica. En esta etapa surgió un desafío clave: balancear las necesidades energéticas reales del centro educativo (cantidad de tomacorrientes e iluminación) con la oferta energética del sistema de baterías que se debía adquirir, en un contexto donde el sistema estaba fuera de servicio y no existían fondos previamente asignados para su reparación.

Este desafío se abordó mediante un enfoque operativo basado en el uso no simultáneo de las cargas, estrategia que se articuló directamente con el proceso de capacitación comunitaria.

El quinto paso correspondió a la búsqueda de los recursos financieros, la cual se realizó mediante una campaña de donaciones que involucró a personas particulares y empresas privadas, con el respaldo de la universidad pública. Este encadenamiento entre usuarios, sociedad civil, universidad y sector privado constituyó la base del proceso de rehabilitación. Posteriormente, se ejecutó la adquisición y traslado de los materiales, etapa que requirió un conocimiento detallado del territorio y la coordinación con actores locales para identificar empresas con capacidad logística para acceder a la zona.

El sexto paso fue la visita técnica de rehabilitación, durante la cual se instalaron los componentes del sistema de energía solar fotovoltaico y se reconstruyó la red eléctrica interna, considerando las necesidades específicas de las personas usuarias para evitar futuras instalaciones improvisadas que comprometiera la seguridad del sistema.

Finalmente, el proceso de rehabilitación concluyó con la puesta en marcha del sistema, la realización de pruebas de funcionamiento y el inicio de un seguimiento técnico, acompañado de un proceso continuo de capacitación, con el objetivo de que las personas usuarias no dependieran completamente de soporte externo para la operación cotidiana del sistema.

B. Capacitación y empoderamiento comunitario (Community Power)

La capacitación y el empoderamiento comunitario se integraron desde las etapas iniciales del proceso, reconociendo que el sistema original no había sido acompañado de estrategias formativas, lo que vulneró su sostenibilidad. El primer paso fue la inclusión activa de la comunidad desde el diagnóstico, explicando en sitio las partes del sistema, las acciones por realizar y promoviendo la participación directa de las personas

en actividades logísticas, como el traslado de herramientas y materiales.

En este proceso participaron algunas personas miembros de la Junta de Educación, el director y personal docente del centro educativo, así como padres y madres de familia de las personas estudiantes.

Paralelamente, el equipo de trabajo de la universidad desarrolló espacios de acercamiento para conocer el contexto histórico, cultural y socioeconómico del territorio. Se generaron espacios de reunión con personas líderes de la comunidad para entender las cualidades del proceso de acercamiento y trabajo conjunto. Se realizaron 3 giras al centro educativo, durante las cuales se trabajó con personas de la comunidad, lo que facilitó la comprensión de las condiciones, oportunidades y necesidades del sistema en el centro educativo.

Un segundo paso consistió en el rediseño del sistema en función de las necesidades reales de la comunidad, incorporando sus prácticas, usos y expectativas como variables centrales del proceso técnico. Durante las etapas de instalación, se promovió la conciencia colectiva sobre el esfuerzo requerido para la consecución de los fondos, fortaleciendo la valoración del sistema como un recurso comunitario.

El tercer paso correspondió a la capacitación formal una vez el sistema estuvo operativo. En esta fase se enfatizó que el sistema pertenece a la comunidad y que su sostenibilidad depende de su gestión local. La capacitación técnica se diseñó de manera accesible, utilizando recursos didácticos que facilitaron una comunicación más adecuada a las características de las personas participantes, abordando conceptos fundamentales como potencia, corriente, energía y vida útil de los equipos. Se buscó que la comunidad pudiera comprender que los componentes del sistema no tienen una vida útil infinita y que, con el tiempo, requerirán reemplazos planificados.

Se emplearon analogías visuales, particularmente con el uso del agua, para explicar el almacenamiento y consumo de energía, evitando comparaciones técnicas complejas y priorizando la comprensión práctica de los límites del sistema. Asimismo, se explicaron los valores máximos admisibles de variables eléctricas críticas para preservar la salud de los equipos.

C. Evaluación del sistema

La evaluación del sistema se diseñó como un proceso técnico y comunitario simultáneo. Se capacitó al personal docente para la extracción e interpretación de datos operativos, definiendo qué variables debían monitorearse y con qué frecuencia. Entre las variables consideradas se incluyeron la potencia instantánea, la energía almacenada en las baterías, los límites operativos del inversor y los patrones de uso diario.

Se explicó a algunas personas de la comunidad y del centro educativo, la capacidad máxima del sistema tanto en términos de potencia como de energía almacenada, considerando el voltaje nominal de operación del sistema. Durante los primeros días de funcionamiento, se solicitó a las personas usuarias el envío periódico de información mediante la aplicación

propietaria del sistema, la cual permite acceder a las variables eléctricas relevantes a través de conexión Bluetooth.

Estos datos permitieron realizar un seguimiento del desempeño del sistema bajo condiciones reales de operación, así como ajustar parámetros de interés durante la etapa inicial, considerando factores como la temperatura ambiente y los patrones de demanda observados. Este proceso de monitoreo temprano contribuyó tanto a la evaluación técnica del sistema como al fortalecimiento del empoderamiento comunitario, al involucrar activamente a las personas usuarias en la gestión de su propia fuente de energía.

III. RESULTADOS

De la misma forma que la metodología, los resultados están estructurados en tres secciones: (A) la rehabilitación del sistema de energía solar, (B) el proceso de capacitación y el empoderamiento comunitario y (C) la evaluación del desempeño del sistema una vez puesto en operación.

A. Rehabilitación del sistema solar fotovoltaico

El primer resultado del proceso de rehabilitación se asocia a la activación del proceso de comunicación. Como producto concreto de esta etapa, la dirección del centro educativo elaboró y envió una comunicación formal que incluyó una carta descriptiva acompañada de fotografías del sistema fotovoltaico dañado y una cronología del problema. Esta comunicación permitió contextualizar adecuadamente la situación del centro educativo, ubicado a aproximadamente 8 km a pie del punto más cercano accesible por vehículo, condición que representa una barrera logística significativa. Este resultado evidencia la importancia de que la comunicación inicial sea detallada e incluya información clave como ubicación, estado del sistema y cantidad de equipos involucrados.

El segundo resultado corresponde a la articulación de redes de apoyo interinstitucional. La información enviada fue difundida por organizaciones no gubernamentales que actuaron como puente entre la comunidad y posibles actores técnicos, logrando que la necesidad fuera comunicada a universidades públicas. Este proceso de difusión permitió activar capacidades técnicas externas que no estaban disponibles a nivel local.

El tercer resultado se deriva de la visita técnica inicial. Se conoció el sistema de energía solar, el cual se muestra de forma esquemática en la Figura 1. Consta de 20 paneles EverExceed ESM330S-156 de 330 W, organizados en 5 grupos en paralelo de 4 paneles en serie cada uno. La tensión de circuito abierto de los paneles es de 45.9 V y la corriente de corto circuito es de 9.16 A.

El controlador de carga es marca Magnum Energy, modelo PT-100 y el inversor del fabricante Schneider Electric, modelo Conext XW+ 6848 NA. El sistema posee además 16 baterías EverExceed GL-12180 de plomo-ácido, con una capacidad de 180 AH y una tensión nominal de 12 V.

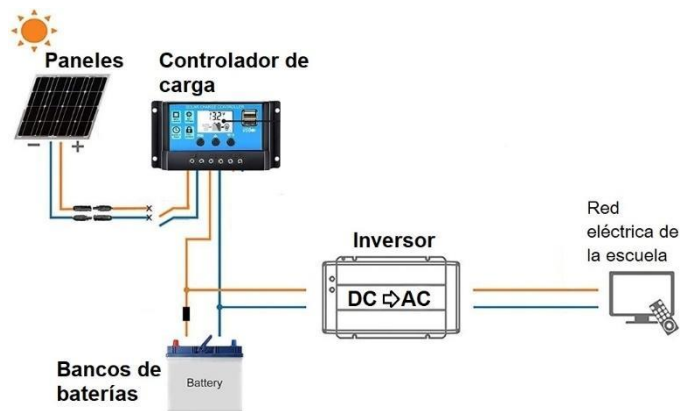


Fig. 1 Esquema del sistema de energía solar del centro educativo.

Durante esta etapa se realizó el diagnóstico integral del sistema y se identificó un fallo del controlador de carga y el deterioro total de las baterías, atribuido principalmente al exceso de tiempo sin uso del sistema.

El cuarto resultado está asociado a la definición del alcance de la rehabilitación. Aunque el sistema contaba originalmente con 16 baterías, se decidió instalar únicamente 12 debido a las limitaciones presupuestarias. Adicionalmente, se definió la reconstrucción completa del sistema de distribución eléctrica en aquellas áreas donde existían instalaciones temporales, manteniendo las secciones funcionales de la red original y agregando nuevas salidas de corriente en función de la demanda expresada por las personas usuarias.

El quinto resultado corresponde a la obtención de los recursos financieros. Como producto de esta etapa se elaboró un resumen de los aportes recibidos por parte de personas particulares y empresas privadas, los cuales fueron gestionados principalmente mediante contactos personales de personas interesadas en colaborar. El monto total invertido fue de 12 200 USD. Estos aportes se presentan en la Tabla 1, que sintetiza las contribuciones que hicieron posible la rehabilitación del sistema. En la Tabla 1 cada columna se debe analizar por separado, por una parte, el 100 % de los costos directos, donde el TEC no dio aporte, y por otra parte el 100 % de los costos totales, donde el TEC sí tuvo participación. También indicar que la Escuela aportó transporte de materiales y la alimentación durante todas las giras.

Finalmente, el sexto resultado del proceso de rehabilitación fue la puesta en operación exitosa del sistema. El sistema quedó funcional y operativo, lo cual se documenta mediante registros fotográficos presentados en las Figuras 2 y 3.

TABLA I
PORCENTAJES DE APORTES PARA LA REHABILITACIÓN DEL SISTEMA

Aportes	Costos directos	Costos totales
Campaña de donaciones	55,1%	36,6%
Empresas privadas*	44,9%	30,8%
TEC	0,0%	32,6%

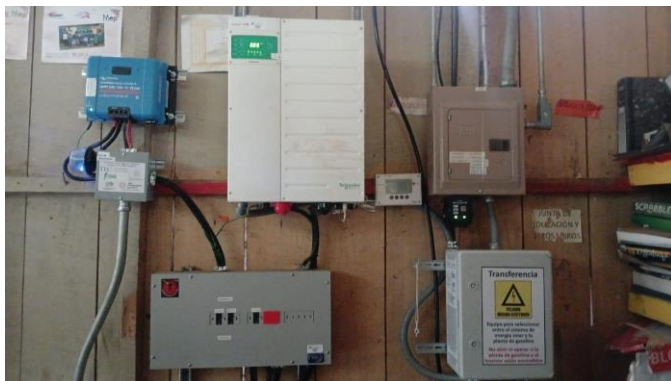


Fig. 2 Equipos de control de la energía solar en operación.



Fig. 3 Centro educativo iluminado por energía solar.

B. Capacitación y empoderamiento comunitario (Community Power)

Los resultados asociados al proceso de capacitación y empoderamiento comunitario se evidencian desde las etapas iniciales del proyecto. Como primer resultado, algunos padres de familia y personal docente del centro educativo participaron activamente durante el diagnóstico del sistema. Este proceso se documenta en la Figura 4, donde se observa la participación directa de personas de la comunidad durante las actividades técnicas.

El segundo resultado de esta etapa fue el rediseño de la red eléctrica interna del centro educativo en función de las necesidades reales de las personas docentes y el director. La red fue diseñada incorporando salidas de tomacorriente específicas según los usos identificados, lo que permitió una distribución más adecuada de la energía y eliminó la necesidad de instalaciones improvisadas.

El tercer resultado corresponde al proceso de capacitación formal una vez el sistema estuvo operativo. La capacitación se desarrolló de manera participativa, tanto presencial como virtual, abordando tanto el funcionamiento del sistema como sus limitaciones. No obstante, en los espacios de trabajo con la comunidad, se hizo evidente para el equipo la necesidad de

contar con personas hablantes de la lengua originaria, para que medien culturalmente las actividades de aprendizaje.

Este proceso se documenta mediante registros fotográficos presentados en las Figuras 5, 6 y 7, donde se observa a algunas de las personas usuarias durante distintas etapas de la capacitación. Estos espacios formativos fortalecieron la apropiación del sistema y sentaron las bases para su gestión comunitaria. Además, permitieron al equipo universitario ampliar su comprensión sobre la visión, los usos y las necesidades energéticas de los pueblos originarios.



Fig. 4 Personas de la comunidad participando en las pruebas de los equipos. (En la fotografía, Lenín)



Fig. 5 Explicación de la operación del sistema a miembros de la Junta de Educación. (En la fotografía, de izquierda a derecha, Alberto Obando, Levi Báñez y Gustavo Richmond)

C. Evaluación del sistema

La evaluación del rendimiento del sistema se realizó mediante el monitoreo de variables eléctricas clave utilizando el software propietario del sistema, mostrado en la Figura 8.

Como resultado de esta etapa, se obtuvieron los datos de funcionamiento bajo condiciones reales de uso, los cuales se grafican usando Python y se presentan en las Figuras 9, 10 y 11. Estas muestran el comportamiento del sistema en términos de rendimiento general, patrones de uso y variables operativas relevantes.

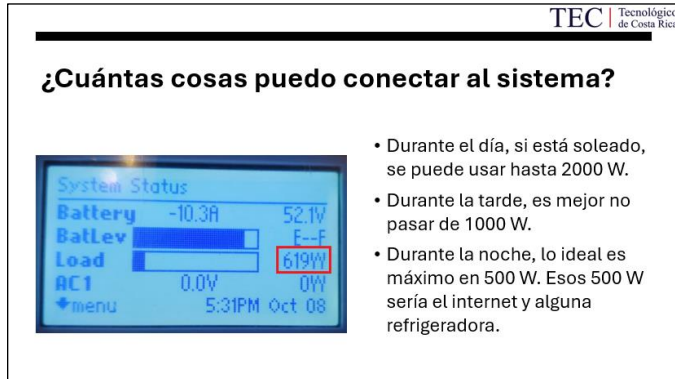


Fig. 6 Explicación de la potencia máxima que se debe extraer del sistema.



Fig. 7 Analogía utilizada durante la capacitación.

La Figura 11 muestra una particularidad que es el mes incompleto. Esto se debe a que, por el cierre de final e inicio de año de la Escuela, se decidió apagar el sistema completamente. Este proceso, así como el de puesta en marcha posterior, se realiza con el acompañamiento del personal técnico de la Universidad.

Durante los primeros días de operación, las personas usuarias participaron activamente en la recolección y el envío de información varias veces al día, lo que permitió realizar un seguimiento temprano del desempeño del sistema y validar su operación dentro de los límites definidos. Más allá de su utilidad técnica, este proceso contribuyó a fortalecer la apropiación del sistema por parte de las personas usuarias, generando confianza en su uso y favoreciendo la comprensión de que las variables eléctricas no son elementos ajenos o complejos, sino indicadores concretos de los límites dentro de

los cuales el sistema opera de manera saludable. Esto implica que el equipo universitario mantiene una comunicación abierta y constante que facilita el seguimiento al desempeño del sistema y la confianza de las personas de la comunidad para consultar, reportar y comunicar el avance del proceso.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la rehabilitación del sistema fotovoltaico ha sido exitosa y significativa, tanto desde el punto de vista técnico como social. Uno de los principales ajustes realizados durante la etapa inicial de operación fue la modificación de los parámetros de tensión máxima de las baterías, considerando los efectos de la temperatura ambiente, lo cual resultó clave para preservar la vida útil de los equipos. Esto se muestra en la Figura 9, pero para mejor claridad, en la Figura 12 se presenta nuevamente el mes de octubre omitiendo algunas variables eléctricas. Ahí se puede observar que para el día 21-10-2025 se registró un pico en el máximo de tensión de las baterías, cercano a 60 V. Esto representa un máximo instantáneo y fue atendido para evitar dañar de forma prematura las celdas de las baterías. La manera de solución fue ajustando la tensión de absorción de 57,6 V a 56,4 V y la de flotación de 55,2 V a 54,4 V. Así se evitan los efectos adversos de los aumentos de temperatura en la zona, la cual alcanza en las baterías hasta 33,6 °C.



Fig. 8 Aplicación VictronConnect para teléfono celular.

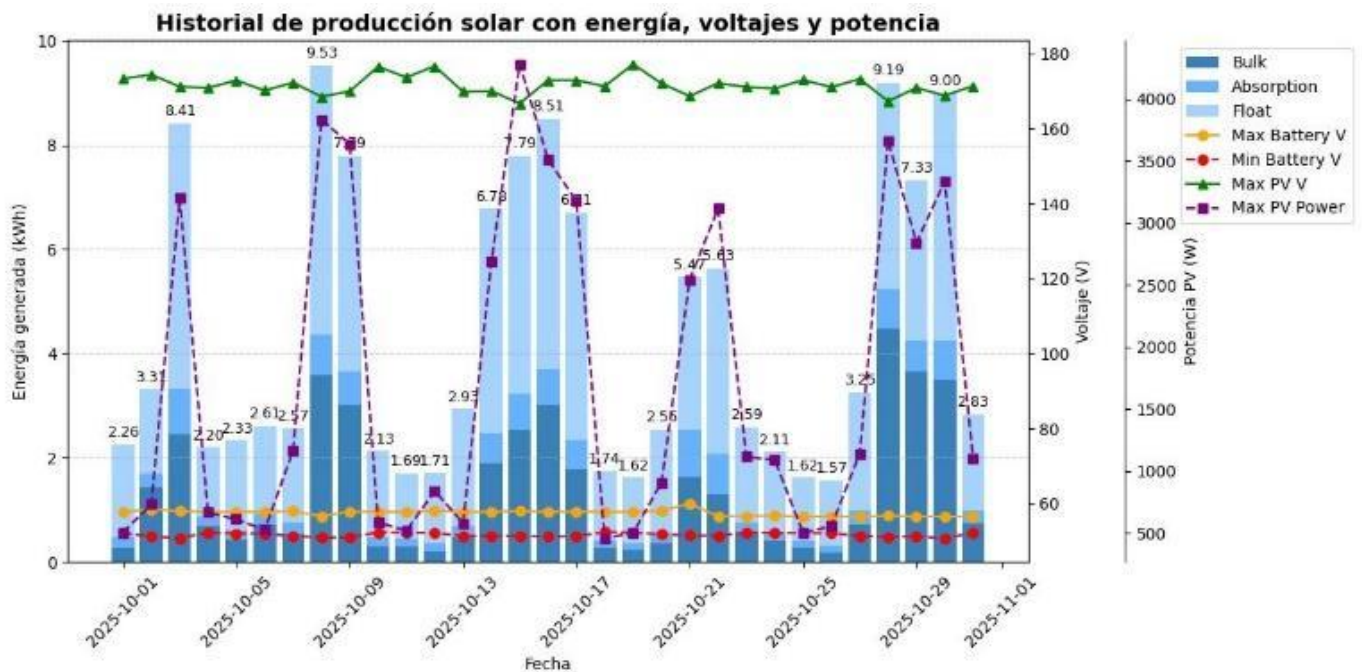


Fig. 9 Funcionamiento del sistema en el mes de octubre de 2025.

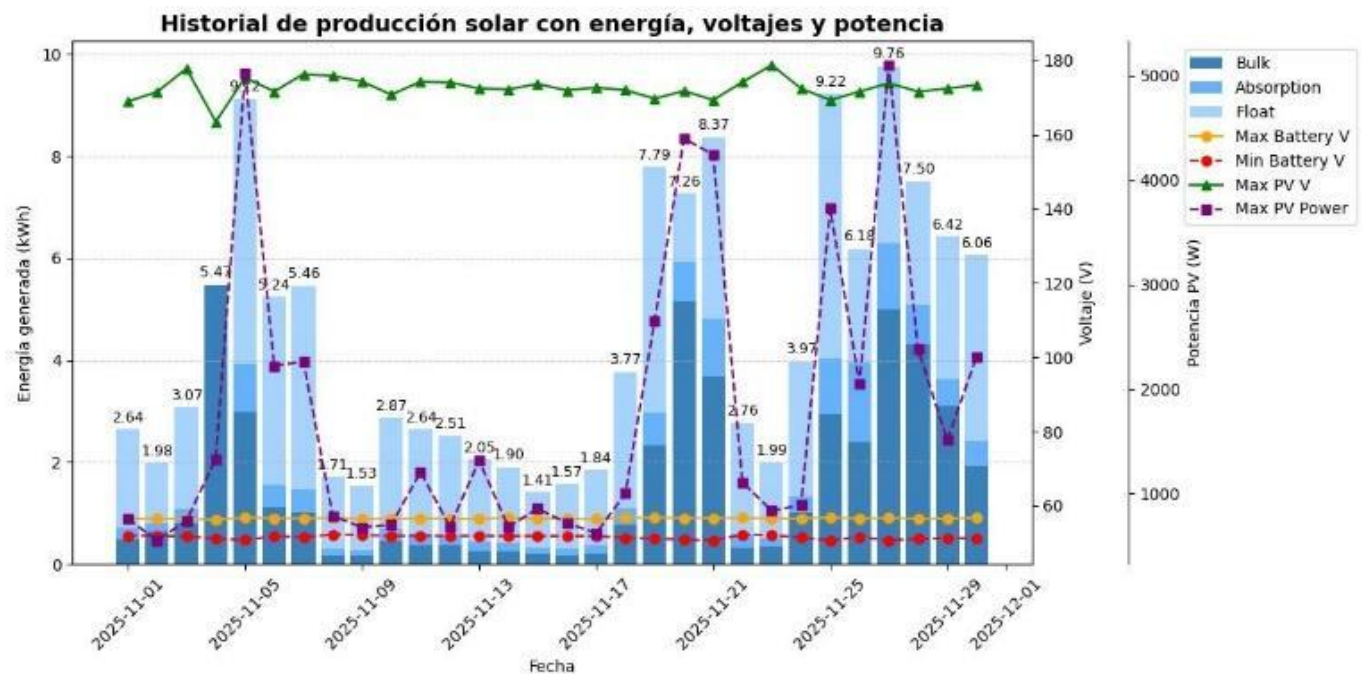


Fig. 10 Funcionamiento del sistema en el mes de noviembre de 2025.

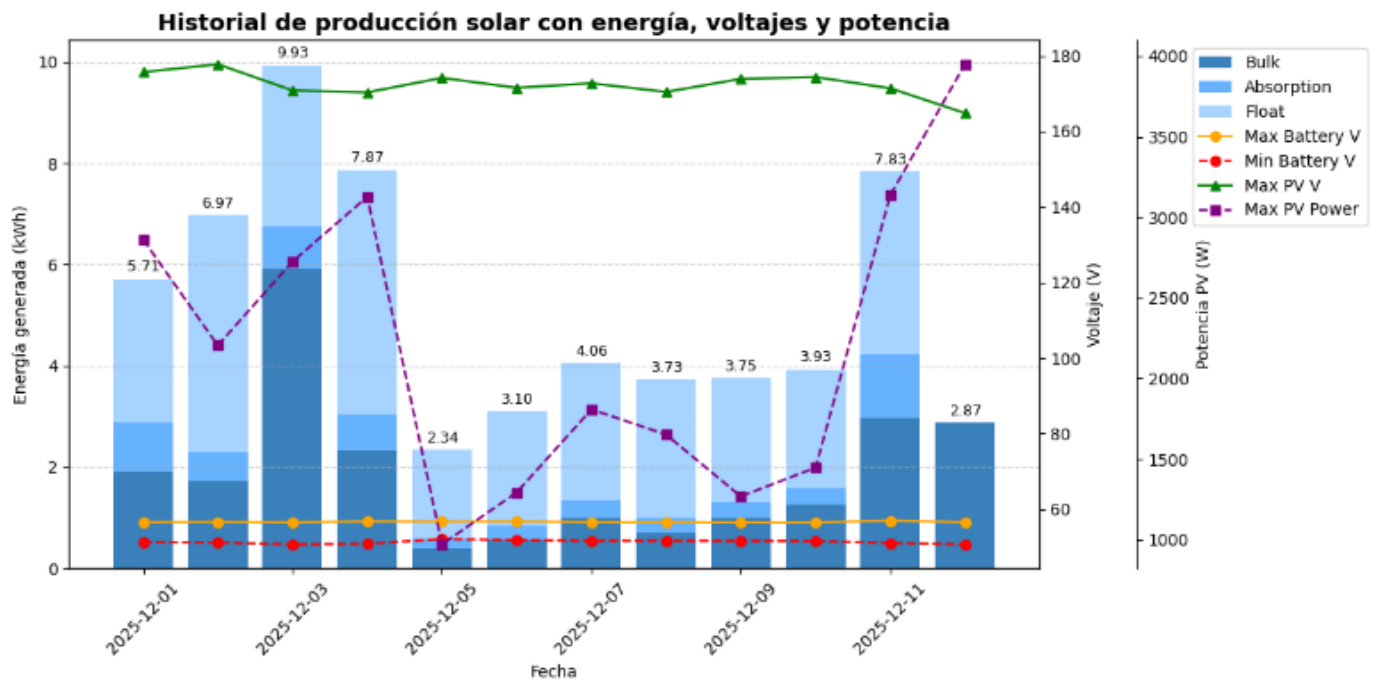


Fig. 11 Funcionamiento del sistema en el mes de diciembre de 2025.

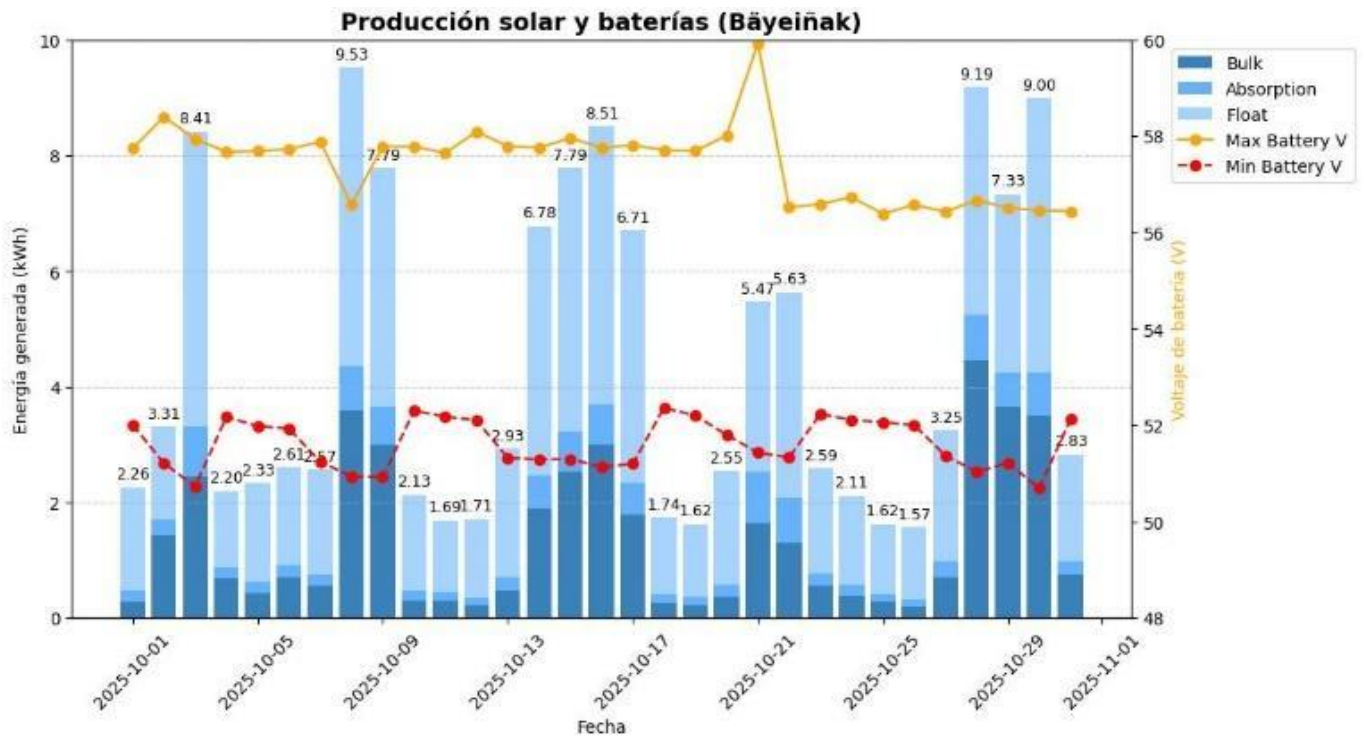


Fig. 12 Funcionamiento del sistema en el mes de octubre de 2025, con énfasis en las baterías.

El proceso puso de manifiesto la importancia de incorporar las solicitudes y necesidades de las personas usuarias en las decisiones técnicas, particularmente en el diseño de la red eléctrica interna. Los principales desafíos del proyecto estuvieron asociados, por un lado, a la logística del traslado de

materiales hacia una zona de difícil acceso, lo que requirió una coordinación estrecha con actores locales, y por otro, a los procesos de comunicación intercultural, dado que el equipo universitario e institucional no maneja la lengua originaria del territorio. En este contexto, la adaptación de los mecanismos de

acercamiento y comunicación resultó clave para facilitar el trabajo conjunto y la implementación de las soluciones técnicas.

El éxito de la rehabilitación se debió tanto a la obtención de donaciones como a la participación activa de la comunidad durante todo el proceso. La combinación de comunicación efectiva, articulación interinstitucional, capacitación y acompañamiento técnico permitió no solo rehabilitar un sistema de energía, sino también brindar acceso continuo a electricidad e internet para las personas estudiantes del centro educativo.

Como lección aprendida, este caso demuestra que, con la aplicación de los principios metodológicos utilizados, una perspectiva socio-técnica, se facilita el éxito en la implementación de una iniciativa porque se articula entre los conocimientos y recursos de una comunidad, con los elementos tecnológicos que atienden una necesidad comunitaria. El énfasis en la comunicación adecuada y constante, la articulación de redes de apoyo y el empoderamiento comunitario son fundamentales. En este sentido, los resultados trascienden el ámbito técnico y constituyen un proceso exitoso que se acerca a la gestión comunitaria de sistemas de energía renovable.

No se puede omitir que los desafíos logísticos y operativos que se afrontaron en este caso no son aislados, sino que deben entenderse en el contexto más amplio de los territorios indígenas en Costa Rica. En el país se reconocen oficialmente ocho pueblos originarios y veinticuatro territorios indígenas, los cuales concentran más del 80 % de los bosques existentes y presentan, en la mayoría de los casos, limitaciones estructurales de acceso a infraestructura y servicios básicos [17], [18]. El territorio específico donde se desarrolló esta experiencia presenta condiciones particularmente complejas de acceso, con afectaciones directas durante la época lluviosa, lo que incide tanto en la logística de intervención como en la sostenibilidad operativa de los sistemas energéticos. Si bien existe una propuesta país orientada a garantizar el acceso universal a servicios básicos, la experiencia analizada evidencia que persiste una deuda histórica del Estado con los pueblos originarios, asociada a procesos de colonización y a la reproducción de prácticas institucionales que limitan la atención oportuna y contextualizada en estos territorios. En este marco, la incorporación de principios de Community Power permitió abordar la rehabilitación no solo como una intervención técnica, sino como un proceso de trabajo conjunto que reconoce las condiciones territoriales, organizativas e históricas de la comunidad.

V. CONCLUSIONES

Este artículo presentó el proceso de rehabilitación de un sistema de energía solar fotovoltaica aislado de la red en un centro educativo ubicado en un territorio indígena, evidenciando que la recuperación de sistemas *off-grid* abandonados constituye una alternativa técnica y económicamente viable frente a la instalación de nuevas infraestructuras, especialmente en contextos rurales y de difícil acceso. Los resultados muestran que, mediante un diagnóstico

integral, la sustitución selectiva de componentes críticos —baterías y controlador de carga— y la adecuación de la red eléctrica interna, fue posible restablecer exitosamente el suministro eléctrico bajo condiciones reales de operación.

Desde el punto de vista técnico, la adaptación del diseño del sistema —en particular la reducción del banco de baterías y la gestión del uso no simultáneo de las cargas— permitió balancear las limitaciones presupuestarias con las necesidades energéticas reales del centro educativo. El monitoreo del desempeño durante varios meses evidenció un funcionamiento estable dentro de los límites definidos y puso de manifiesto la importancia de ajustar parámetros operativos, como la tensión de carga de las baterías, considerando factores ambientales como la temperatura para preservar la vida útil de los equipos. En coherencia con esta lógica, la estrategia de operación se complementó con un enfoque de capacitación orientado a la gestión responsable del consumo energético, evitando la sobrecarga del sistema y promoviendo el uso no simultáneo de cargas, aspecto clave en contextos rurales aislados donde la sostenibilidad depende también de las prácticas de uso.

En relación con las condiciones de implementación, desde una perspectiva convencional de la ingeniería, una rehabilitación de este tipo debería estar acompañada de documentación completa, incluyendo planos detallados, inventarios exhaustivos de cargas y un dimensionamiento basado en escenarios de demanda plenamente caracterizados. Sin embargo, este trabajo se desarrolló en un contexto de intervención real condicionado por la disponibilidad limitada de recursos, donde el sistema fue reconstruido exclusivamente con componentes obtenidos mediante donaciones y sin posibilidad de rediseño integral. En consecuencia, el alcance técnico estuvo determinado por estas restricciones, priorizando la restitución del servicio eléctrico sobre la optimización teórica, lo que sitúa el estudio dentro de un marco de ingeniería aplicada en condiciones de escasez.

Un aporte central del estudio fue la incorporación explícita de principios de *Community Power* a lo largo de todo el proceso de rehabilitación. La participación activa de la comunidad desde el diagnóstico inicial, la articulación de redes de apoyo interinstitucionales y los espacios de aprendizaje con las personas usuarias sobre conceptos básicos de energía, potencia y límites del sistema resultaron determinantes para fortalecer la apropiación local y reducir la dependencia de soporte técnico externo. Asimismo, la experiencia evidenció que la alta rotación del personal educativo en territorios rurales e indígenas limita la efectividad de esquemas formativos centrados en grupos técnicos permanentes, por lo que se optó por un modelo de capacitación amplio y distribuido entre múltiples actores de la comunidad educativa, fortaleciendo la resiliencia operativa y la continuidad del conocimiento. Se espera que este empoderamiento comunitario contribuya tanto a la mejora de la operación cotidiana como a la sostenibilidad a largo plazo del sistema; en futuros procesos, este enfoque podría fortalecerse mediante la incorporación de personas hablantes de la lengua originaria como mediadores culturales.

Asimismo, la experiencia documentada aporta evidencia empírica relevante —aún escasa en la literatura— sobre el desempeño real de sistemas fotovoltaicos rehabilitados en contextos educativos rurales. El involucramiento de las personas usuarias en el monitoreo y la interpretación de variables eléctricas permitió validar el funcionamiento del sistema bajo patrones reales de demanda y consolidar capacidades locales para su gestión futura.

En conjunto, este caso de estudio sugiere que las intervenciones de electrificación rural basadas en la rehabilitación de sistemas existentes deben concebirse como procesos socio-técnicos integrales. Para futuras iniciativas, se recomienda priorizar esquemas que combinen diseño técnico adaptado, estrategias de capacitación contextualizadas y prácticas organizativas orientadas a la autonomía comunitaria. En este sentido, los enfoques de *Community Power* tienen el potencial de transformar las iniciativas de energía renovable en territorios rurales e indígenas, pasando de soluciones tecnológicas de corto plazo a sistemas energéticos apropiados, resilientes y sostenibles en el tiempo.

Como línea de trabajo futuro, esta experiencia constituye un punto de partida para un proceso más sistemático de fortalecimiento de capacidades energéticas en territorios indígenas, orientado tanto a la rehabilitación técnica como al aprendizaje mutuo entre la universidad y las comunidades. A partir de esta iniciativa, se está articulando una estrategia de extensión que contempla el diagnóstico técnico, social y cultural de sistemas fotovoltaicos en otras escuelas del territorio, incorporando metodologías participativas y un enfoque interdisciplinario. Asimismo, se busca avanzar hacia un modelo de sostenibilidad que trascienda intervenciones aisladas, mediante esquemas más formales de articulación institucional y colaboración con actores públicos y privados que permitan escalar y replicar estas experiencias.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica por apoyar la rehabilitación del sistema de energía solar y a la Maestría en Administración de la Ingeniería Electromecánica financiar la realización de esta publicación. A las personas que integraron el equipo de trabajo en sitio para la rehabilitación del sistema de energía solar. A las empresas que donaron para esta campaña: muy especialmente a SOMABACU que resolvió el desafío logístico de traslado de materiales y Electrocaribe que aportó, además de donaciones, personal técnico para el diagnóstico; a TreeNets, Solutia, IT Solutions, IEEE Computer Society Costa Rica Chapter y a las personas de la sociedad civil que, de manera generosa y en muchos casos anónima, participaron con sus donaciones. [Aquí](#) se registran sus nombres.

REFERENCES

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), INEC presenta infografía especial sobre la educación en Costa Rica. [Online]. Available: <https://inec.cr/noticias/inec-presenta-infografia-especial-sobre-la-educacion-costa-rica> [Accessed: Jan. 24, 2026]
- [2] Costa Rica mantiene 99.4% de cobertura eléctrica, Revista Summa. [Online]. Available: <https://revistasumma.com/costa-rica-mantiene-994-de-cobertura-electrica/> [Accessed: Jan. 24, 2026]
- [3] Cinco territorios indígenas ya cuentan con electricidad gracias a paneles solares, Ojo al Clima. [Online]. Available: <https://ojoalclima.com/articulos/cinco-territorios-indigenas-ya-cuentan-con-electricidad-gracias-a-paneles-solares> [Accessed: Jan. 24, 2026]
- [4] G. Richmond-Navarro, R. Madriz-Vargas, N. Ureña-Sandi, and F. Barrientos-Johansson, "Research opportunities for renewable energy electrification in remote areas of Costa Rica," *Perspectives on Global Development and Technology*, vol. 18, no. 5–6, pp. 553–563, 2019.
- [5] M. J. Amador, B. Obregón, J. Ambrozic, and G. Richmond-Navarro, "Viabilidad en la implementación de ASETs en la zona indígena Nai Teri, para la generación de energía eléctrica sostenible," *Revista Tecnología en Marcha*, p. 38, 2025.
- [6] B. L. Miravet-Sánchez, A. E. García-Rivero, R. A. Yuli-Posadas, L. A. Inostroza-Ruiz, V. Fernández-Guzmán, Y. A. Chávez-Juanito, et al., "Solar photovoltaic technology in isolated rural communities in Latin America and the Caribbean," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1238–1248, 2022.
- [7] K. Keisang, T. Bader, and R. Samikannu, "Review of operation and maintenance methodologies for solar photovoltaic microgrids," *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, Art. no. 730230, 2021.
- [8] Y. T. Wassie and E. O. Ahlgren, "Performance and reliability analysis of an off-grid PV mini-grid system in rural tropical Africa: A case study in southern Ethiopia," *Development Engineering*, vol. 8, Art. no. 100106, 2023.
- [9] O. Fred, K. J. Ukagwu, A. Abdulkarim, and V. H. U. Eze, "Reliability and maintainability analysis of solar photovoltaic systems in rural regions: A narrative review of challenges, strategies, and policy implications for sustainable electrification," *KIU Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 103–122, 2024.
- [10] G. Richmond-Navarro, R. Madriz-Vargas, N. Ureña-Sandi, F. Barrientos-Johansson, S. Murillo-Rodríguez, V. Chavarría-Castillo, and M. Chaves-Chacón, "Challenges and opportunities for indigenous community power research in Costa Rica," in Proc. 2nd World Community Power Conference, Bamako, Mali, Nov. 8–10, 2018.
- [11] A. M. Samatar, S. Mekhilef, H. Mokhlis, M. Kermadi, and O. Alshammari, "Performance analysis of hybrid off-grid renewable energy systems for sustainable rural electrification," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 24, Art. no. 100780, 2024.
- [12] W. López-Castrillón, H. H. Sepúlveda, and C. Mattar, "Off-grid hybrid electrical generation systems in remote communities: Trends and characteristics in sustainability solutions," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, Art. no. 5856, 2021.
- [13] T. Costa and R. Santos, "Sizing and deploying an off-grid energy system for rural electrification in an Amazonian remote community," in Proc. 15th IEEE Int. Conf. Industry Applications (INDUSCON), 2023, pp. 378–385.
- [14] A. A. Eras-Almeida, T. Vásquez-Hernández, M. J. Hurtado-Moncada, and M. A. Egido-Aguilera, "A comprehensive evaluation of off-grid photovoltaic experiences in non-interconnected zones of Colombia: Integrating a sustainable perspective," *Energies*, vol. 16, no. 5, Art. no. 2292, 2023.
- [15] E. F. Moran, M. C. Lopez, R. Mourão, E. Brown, A. M. McCright, J. Walgren, et al., "Advancing convergence research: Renewable energy solutions for off-grid communities," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 119, no. 49, Art. no. e2207754119, 2022.
- [16] J. Cross and T. Neumark, "Solar power and its discontents: Critiquing off-grid infrastructures of inclusion in East Africa," *Development and Change*, vol. 52, no. 4, pp. 902–926, 2021.
- [17] J. Carballo, "Los grupos indígenas costarricenses," Proyecto GEIC, Costa Rica. [Online]. Available: <https://accesoalajusticia.poder-judicial.go.cr/index.php/indigenas/category/474-investigacion-indigena?download=1606:los-grupos-indigenas-en-cr>
- [18] Y. Rojas Morales, "Los planes ambientales forestales y territoriales como herramientas de planificación para los territorios indígenas en Costa Rica," *Ambientico*, no. 287, pp. 22–28, 2023. [Online]. Available: <https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/los-planes-ambientales-forestales-y-territoriales-como-herramientas-de-planificacion-para-los-territorios-indigenas-en-costa-rica/>