

SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO DE BAJA POTENCIA PARA ILUMINACIÓN SUSTENTABLE EN COMUNIDADES RURALES

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.738122516121>

Ana María Zunza Carenzo

Universidad Autónoma de Campeche
Estudiante de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
San Francisco de Campeche, México

José Saúl Gómez Chávez

Universidad Autónoma de Campeche,
Estudiante de Mecánica Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.

Germán Escalante Notario

Universidad Autónoma de Campeche
Posgrado de la Facultad de Ingeniería
San Francisco de Campeche, México
ORCID: 0000-0002-5900-4570

Mauricio I. Huchin Miss

Universidad Autónoma de Campeche
Posgrado de la Facultad de Ingeniería
San Francisco de Campeche, México
ORCID: 0000-0002-5669-9098

Mariana Candelaria Camacho Yah

Universidad Autónoma de Campeche
Estudiante de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
San Francisco de Campeche, México

Eduardo Romero Ramírez

Universidad Autónoma de Campeche
Estudiante de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
San Francisco de Campeche, México

RESUMEN: Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema fotovoltaico autónomo de baja potencia orientado a satisfacer necesidades básicas de iluminación en comunidades rurales sin acceso a la red eléctrica, demostrando cómo la energía solar puede convertirse en una solución tecnológica y socialmente pertinente en el sureste de México. El proyecto se articuló en tres etapas: el diseño energético del sistema, donde se calcularon los requerimientos de generación y almacenamiento; el montaje de un prototipo portátil que integra paneles fotovoltaicos, controlador, batería, inversor y luminarias LED, priorizando la seguridad y la facilidad de implementación; y la evaluación experimental bajo condiciones reales, mediante pruebas de carga y descarga, operación directa con los paneles y verificación del desempeño del inversor en distintos rangos de voltaje. Los resultados evidenciaron un funcionamiento eficiente, estable y técnicamente viable para alimentar cargas de iluminación de baja potencia, además de subrayar el valor formativo y social de las energías renovables como herramienta que acerca a los estudiantes de ingeniería a problemáticas reales del territorio y contribuye al bienestar y autonomía energética de comunidades rurales de Campeche.

PALABRAS CLAVE: Energía fotovoltaica, iluminación LED, sostenibilidad.

LOW POWER AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR SUSTAINABLE LIGHTING IN RURAL COMMUNITIES

ABSTRACT: This work presents the development of a low-power, autonomous photovoltaic system designed to meet basic lighting needs in rural communities without access to the electrical grid, demonstrating how solar energy can become a technologically and socially relevant solution in southeastern Mexico. The project was structured in three stages: the energy design of the system, where generation and storage requirements were calculated; the assembly of a portable prototype integrating photovoltaic panels, a controller, a battery, an inverter, and LED lights, prioritizing safety and ease of implementation; and experimental evaluation under real-world conditions, through charge and discharge tests, direct operation of the panels, and verification of the inverter's performance at different voltage ranges. The results demonstrated efficient, stable, and technically viable operation for powering low-power lighting loads, and also underscored the educational and social value of renewable energies as a tool that connects engineering students to real-world problems in the region and contributes to the well-being and energy independence of rural communities in Campeche.

KEYWORDS: photovoltaic energy, LED lighting, sustainability.

INTRODUCCIÓN

En México, la energía fotovoltaica ha transitado en pocos años de ser una tecnología emergente, a convertirse en uno de los pilares de la transición energética nacional. Su rápida expansión, observable en las estadísticas de capacidad instalada publicadas por la Secretaría de Energía y la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), refleja un crecimiento sostenido impulsado tanto por la reducción de costos como por la necesidad de soluciones energéticas limpias en regiones donde la infraestructura eléctrica permanece limitada o intermitente. El papel estratégico que la energía solar ha adquirido en el país ha aumentado particularmente en estados del sureste con altos niveles de irradiancia (SENER, 2024), (IEA, 2024).

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las principales fuentes renovables para la generación eléctrica, al aprovechar la radiación solar mediante dispositivos semiconductores denominados celdas fotovoltaicas. Estos dispositivos convierten directamente la energía del sol en electricidad a través del efecto fotovoltaico, fenómeno físico basado en la excitación de electrones cuando la radiación incide sobre materiales como el silicio. Este principio constituye la base de funcionamiento de todos los sistemas fotovoltaicos modernos.

En este contexto, los sistemas fotovoltaicos se han consolidado como una alternativa robusta y de bajo mantenimiento para aplicaciones que van desde pequeñas instalaciones domésticas hasta sistemas autónomos de electrificación rural. Los sistemas fotovoltaicos autónomos destacan por su capacidad de operar de manera completamente independiente de la red eléctrica, integrando paneles solares, controladores de carga, baterías e inversores para cubrir necesidades energéticas específicas. Su pertinencia es particularmente evidente en comunidades rurales y zonas remotas donde la expansión de la red resulta económicamente inviable o técnicamente compleja, y donde la disponibilidad de energía eléctrica influye directamente en la seguridad, movilidad y calidad de vida de la población (CONUEE, 2023). En el caso de la iluminación doméstica o comunitaria de baja potencia, las luminarias LED de alta eficiencia han permitido reducir el consumo eléctrico, optimizar el tamaño del sistema y disminuir los costos, haciendo viable la adopción de soluciones solares incluso en entornos económicos vulnerables (World Bank, 2024).

No obstante, la implementación efectiva de un sistema fotovoltaico autónomo requiere un diseño profundamente contextualizado. Es indispensable considerar la irradiancia solar promedio, la autonomía nocturna necesaria, la capacidad de almacenamiento y el perfil de uso del usuario final para garantizar que el sistema opere con eficiencia y mantenga una vida útil prolongada (UNAM, 2023). Bajo esta perspectiva, este capítulo propone el diseño, instalación y evaluación de un sistema fotovoltaico autónomo de baja potencia destinado a proporcionar iluminación en

viviendas rurales con acceso limitado o nulo a la red eléctrica. La iniciativa busca no solo verificar la viabilidad técnica del sistema bajo condiciones reales, sino también mostrar a estudiantes y lectores cómo la tecnología solar, correctamente dimensionada y adaptada al contexto local, puede transformarse en una herramienta de empoderamiento energético, social y ambiental.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La parte experimental se compone de 2 etapas: diseño y montaje del sistema fotovoltaico autónomo (SFVA).

Diseño del SFV autónomo

Como primera fase, se realizó el cálculo del número de paneles necesarios para alimentar una carga compuesta por dos lámparas LED, cada una con una potencia nominal (P) de 9 W y un tiempo de uso diario (t) de 10 horas. La demanda diaria de energía (E_{carga}) se determinó mediante la **Ecuación 1**:

$$E_{carga} = P \times t \times n \quad (1)$$

El valor obtenido, equivalente a 180 Wh, fue ajustado considerando la eficiencia del inversor ($\eta_{inversor} = 85\%$), de acuerdo con la **Ecuación 2**, resultando una energía real requerida de aproximadamente 212 Wh.

$$E_{real} = \frac{E_{carga}}{\eta_{inversor}} \quad (2)$$

Para el almacenamiento se seleccionó una batería de ácido-plomo de 12 V y 45–50 Ah, con una profundidad de descarga (DoD) del 30 %, por no tratarse de una batería de ciclo profundo. La energía útil disponible ($E_{bat-util}$), calculada mediante la **Ecuación 3**, fue de 189 Wh, lo cual evidencia un déficit respecto a la demanda total estimada.

$$E_{\text{batería útil}} = V_{\text{bat}} \times C_{\text{bat}} \times \text{profundidad de descarga} \quad (3)$$

La potencia requerida de generación se calculó empleando las Horas Sol Pico (HSP) promedio de Campeche (5.85 h/día), conforme a la **Ecuación 4**:

$$\text{Potencia requerida} = \frac{E_{\text{paneles}}}{\text{HSP}} \quad (4)$$

El resultado (36.24 W) indicó la necesidad de al menos dos paneles fotovoltaicos de 25 W, de acuerdo con la **Ecuación 5**, redondeando al entero superior para asegurar un margen operativo ante pérdidas o baja irradiación.

$$\text{Número de paneles} = \frac{\text{Potencia requerida}}{P_{\text{panel}}} \quad (5)$$

Montaje del sistema

A partir de los cálculos realizados, el SFV se configuró con dos paneles fotovoltaicos de 25 W conectados en paralelo, un controlador de carga solar MPPT de 100 A, una batería de ácido-plomo de 12 V, y una carga compuesta por dos lámparas LED de 9 W cada una, además de las protecciones eléctricas requeridas.

En la **Figura 1** se muestra el diagrama eléctrico del sistema, donde se ilustran los principales componentes.

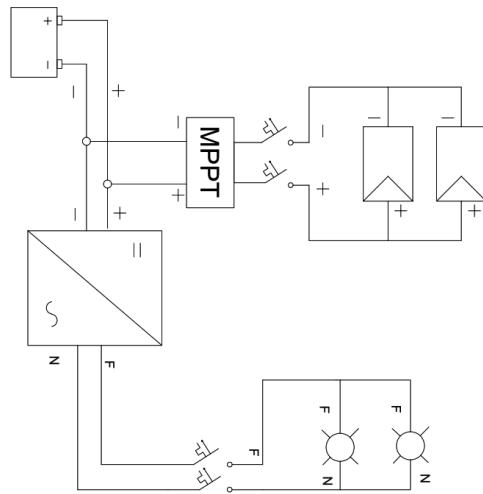


Figura 1. Diagrama eléctrico del SFV autónomo.

La estructura física fue construida sobre un tablero de melanina, con un marco reforzado que facilita el transporte y soporte del sistema completo. La **Figura 2** presenta el montaje final del SFV autónomo, mostrando su configuración compacta y portátil. Para validar el funcionamiento del sistema, se realizaron 4 pruebas:

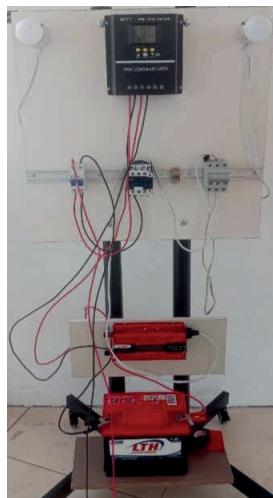


Figura 2. Montaje completo del SFV autónomo.

Tiempo de carga: estimación del tiempo necesario para cargar completamente la batería con la energía generada por los dos paneles de 25 W.

Tiempo de descarga: determinación del periodo de suministro energético desde la batería hacia la carga sin aporte solar.

Operación directa: verificación del funcionamiento de las lámparas alimentadas exclusivamente por los paneles fotovoltaicos, sin respaldo de la batería.

Protección del inversor: identificación del voltaje mínimo de entrada en corriente directa (DC) a partir del cual el inversor activa su sistema de protección y se apaga.

Estas pruebas permitieron evaluar el desempeño energético, la autonomía y la eficiencia global del sistema fotovoltaico autónomo, comprobando su viabilidad técnica como solución de iluminación sustentable para comunidades rurales de Campeche.

RESULTADOS

Las diversas pruebas realizadas al SFV autónomo ayudaron a evaluar su desempeño. Fue fundamental verificar que el sistema consiguiera energía correctamente desde los paneles fotovoltaicos. Por esta razón, se consideró importante medir el voltaje en dos puntos clave: la salida directa del arreglo de paneles y la entrada del sistema de protección, ambos conectados mediante una extensión. Se registró un voltaje de 21.18 V en la salida directa del arreglo y 20.65 V en la terminación de la extensión, justo antes de la protección. La disminución observada en el voltaje se atribuye a la caída por la longitud del cableado.

Tiempo de carga de la batería

En esta prueba se midió el tiempo necesario para cargar la batería usando solo la energía generada por los dos paneles fotovoltaicos conectados en paralelo. Se registraron los valores de voltaje y corriente a lo largo del proceso para conocer el comportamiento del sistema y la eficiencia de carga. Los resultados se muestran en la **Tabla 1**.

Hora del día (hrs)	Corriente (A)	Voltaje (V)
12:21	0.9	11.5
12:27	3.1	13.1

Tabla 1. Tiempo de carga de la batería con el SFV.

Tiempo de descarga de la batería con la carga

Para esta prueba se desconectaron los paneles para evitar la entrada de energía y medir cuánto tiempo la batería podía mantener encendidas las lámparas LED. Esto permitió conocer la capacidad real de almacenamiento y descarga del sistema. Los datos obtenidos se presentan en la **Tabla 2**.

Hora del día (hrs)	Voltaje (V)	Voltaje inversor (V)
12:44	13.1	114
12:57	10.9	114

Tabla 2. Tiempo de descarga de la batería con el SFV.

Funcionamiento con desconexión de la batería

La batería del sistema se desconectó (ver **Figura 3**), con el propósito de comprobar si la carga de iluminación podía operar únicamente con la energía generada de manera instantánea por los paneles fotovoltaicos. Esta prueba permitió verificar la capacidad del arreglo fotovoltaico (ver **Figura 1**) para sostener el funcionamiento directo de la carga sin apoyo del sistema de almacenamiento, así como observar el comportamiento de la tensión en condiciones de irradiancia variable.

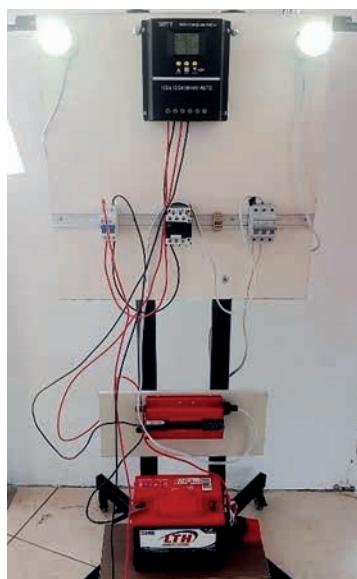


Figura 3. Desconexión de la batería.

Voltaje mínimo requerido por el inversor

En esta prueba se utilizó una fuente de voltaje variable para determinar el valor de voltaje mínimo que permite el funcionamiento del inversor antes de que se apague por protección, como se muestra en la **Figura 4**. Este análisis ayudó a definir los límites seguros de operación del sistema. Los resultados se muestran en la **Tabla 3**.

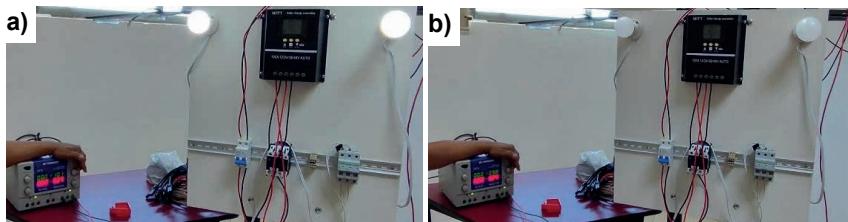


Figura 4. Variación del voltaje del inversor, a) voltaje superior a 10 V y b) voltaje menor a 10 V.

Voltaje suministrado (V)	Porcentaje (%)	Situación del inversor
12.5	100	Encendido
10.0	80	Apagado

Tabla 3. Variación del voltaje del inversor.

ANÁLISIS Y DISCUSIONES

Durante la prueba de carga se observó que la batería alcanzó niveles adecuados de voltaje en un tiempo proporcional a la irradiancia disponible durante el día. A medida que aumentó la radiación solar, también lo hizo la corriente de carga, mostrando el buen desempeño del controlador MPPT al optimizar la captación de energía. El sistema logró completar la carga en el tiempo estimado teóricamente, lo que confirma la correcta selección de los paneles y la coherencia entre la capacidad de almacenamiento y la demanda energética del sistema.

Al desconectar los paneles fotovoltaicos, la batería mantuvo encendidas las lámparas LED durante el periodo previsto, hasta alcanzar el voltaje mínimo recomendado para evitar una descarga profunda. El comportamiento del voltaje mostró una disminución gradual, indicando una entrega estable de energía. Estos resultados evidencian que la capacidad de la batería es suficiente para cubrir las horas de uso estimadas, siempre que se mantenga dentro del rango seguro de descarga.

En la prueba sin batería se comprobó que el sistema puede alimentar la carga directamente con la energía solar incidente. No obstante, se detectaron fluctuaciones en la intensidad luminosa debido a los cambios en la irradiancia, especialmente en momentos de nubosidad parcial. Esto confirma que la batería cumple un papel fundamental como elemento regulador, ya que proporciona continuidad y estabilidad al suministro eléctrico cuando la generación fotovoltaica presenta variaciones.

En la última prueba se determinó que el inversor se apaga automáticamente al descender el voltaje por debajo del valor umbral especificado por el fabricante, activando su sistema de protección. Este comportamiento asegura la integridad del equipo y evita daños por operación en condiciones inadecuadas. Los resultados validan el correcto dimensionamiento del sistema y la importancia de mantener un nivel mínimo de tensión para garantizar una operación segura y eficiente.

CONCLUSIÓN

El sistema fotovoltaico autónomo mostró un funcionamiento eficiente al alimentar luminarias LED. Las pruebas validaron su correcta carga, descarga y estabilidad ante variaciones de irradiancia, confirmando su viabilidad técnica y sustentable como alternativa de iluminación para comunidades rurales del estado de Campeche.

REFERENCIAS

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2023). Guía técnica para la implementación de sistemas fotovoltaicos en comunidades rurales. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conuee>

International Energy Agency (IEA). (2024). Renewables 2024: Analysis and forecast to 2029. <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>

Secretaría de Energía (SENER). (2024). Transición energética y electrificación rural en México. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener>

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2023). Energía solar para el desarrollo rural en México. Instituto de Energías Renovables. <https://www.ier.unam.mx>

World Bank. (2024). Off-grid solar market trends report 2024. <https://www.worldbank.org>