



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

MEJORA DE LA DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA DE UNA PALAPA FOTOVOLTAICA AISLADA MEDIANTE SELECCIÓN DE COMPONENTES, COMO BANCO DIDÁCTICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**IMPROVING THE ENERGY AVAILABILITY OF AN OFF-
GRID PHOTOVOLTAIC PALAPA THROUGH COMPONENT
SELECTION, AS AN INDUSTRIAL ENGINEERING TEACHING
BENCH**

Roberto Cristian Delgado Arcos

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Brayan Hernandez Rodriguez

Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca

Edgar Adan Rubio Olivares

Tecnológico de Estudios Superiores de Huixquilucan

Elizabeth Michel Cruz López

Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán

Alberto Vera Camacho

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Fátima Viridiana De la Vega Reyes

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Manuel González Pérez

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Mejora de la disponibilidad energética de una palapa fotovoltaica aislada mediante selección de componentes, como banco didáctico de ingeniería industrial

Roberto Cristian Delgado Arcos¹

roberto.da@personal.uttecarn.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7127-4696>

Universidad Tecnológica de Tecamachalco,
Tecamachalco, Puebla, México

Brayan Hernandez Rodriguez

228n0153@itstb.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0001-3043-2109>

Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca,
Tierra Blanca, Veracruz, México.
Programa Delfín

Edgar Adan Rubio Olivares

123090432@huixquilucan.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0009-3308-5569>

Tecnológico de Estudios Superiores de
Huixquilucan, Huixquilucan, Estado de México,
México
Programa Delfín

Elizabeth Michel Cruz López

2024150030065@tesjo.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0006-9390-8887>

Tecnológico de Estudios Superiores de
Jocotitlán, Jocotitlán, Estado de México,
México.
Programa Delfín

Alberto Vera Camacho

alberto.vc@personal.uttecarn.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5990-9353>

Universidad Tecnológica de
Tecamachalco, Tecamachalco, Puebla, México

Fátima Viridiana De la Vega Reyes

fatima.dlvr@personal.uttecarn.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0000-9008-1171>

Universidad Tecnológica de
Tecamachalco, Tecamachalco, Puebla, México

Manuel González Pérez

m.gonzalez.perez@personal.uttecarn.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8700-2866>

Universidad Tecnológica de Tecamachalco
Enlace SECIHTI
Programa Delfín 2026
México

RESUMEN

La selección y el dimensionamiento de los componentes de un sistema fotovoltaico aislado constituyen un problema de decisión propio de la ingeniería industrial, con criterios técnicos y económicos en conflicto. El objetivo fue mejorar la disponibilidad de la energía que proporciona una palapa fotovoltaica mediante una evaluación multicriterio de sus componentes, sobre un banco didáctico de bajo costo y bajo el enfoque de aprendizaje basado en proyectos, con estudiantes de un programa nacional de verano de investigación. Se evaluaron diez configuraciones que combinaron cinco controladores de carga, de dos tecnologías, y dos inversores, sobre un arreglo fijo de dos paneles de 250 vatios y una batería sellada de plomo-ácido de 12 voltios y 18 amperios-hora, con un perfil de carga diurno y nocturno. La batería gobernó el sistema y la configuración más adecuada combinó el controlador con seguimiento del punto de máxima potencia y el inversor de menor consumo en vacío. Se propusieron dos cambios justificados —alimentar la iluminación nocturna en corriente directa y ampliar el banco de almacenamiento— con los que la operación nocturna pasó de inviable a segura. La experiencia se vinculó con competencias de ingeniería industrial y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: energía solar; aprendizaje basado en proyectos; análisis multicriterio; competencias profesionales; desarrollo sostenible.

¹Autor principal

Correspondencia: roberto.da@personal.uttecarn.edu.mx

Improving the energy availability of an off-grid photovoltaic palapa through component selection, as an industrial engineering teaching bench

ABSTRACT

Selecting and sizing the components of an off-grid photovoltaic system is a decision problem characteristic of industrial engineering, with conflicting technical and economic criteria. The objective was to improve the availability of energy supplied by a photovoltaic palapa through a multi-criteria evaluation of its components on a low-cost didactic test bench, using a project-based learning approach with students from a national summer research program. Ten configurations were evaluated, combining five charge controllers from two technologies and two inverters, on a fixed array of two 250-watt panels and a sealed lead-acid battery rated at 12 volts and 18 ampere-hours, with daytime and nighttime load profiles. The battery governed the system, and the most suitable configuration combined the maximum-power-point-tracking controller and the inverter with the lowest idle consumption. Two justified changes were proposed—powering night lighting with direct current and expanding the storage bank—which turned night operation from infeasible into safe. The experience was linked to industrial engineering competencies and to the Sustainable Development Goals.

Keywords: solar energy; project-based learning; multi-criteria analysis; professional competencies; sustainable development.

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

La transición energética mundial ha posicionado a la tecnología solar fotovoltaica como pilar de la matriz eléctrica del siglo XXI, lo que exige una expansión sin precedentes de la fuerza laboral especializada (Senthil, 2022). México presenta niveles de irradiación de 5.0 a 6.5 kWh/m² en gran parte de su territorio, junto con compromisos de energía limpia derivados de la Agenda 2030. En este contexto, las Universidades Tecnológicas —de formación práctica y vinculada con la industria— ocupan un lugar estratégico para preparar a quienes diseñarán, instalarán y mantendrán estos sistemas. Persiste, sin embargo, una brecha. Una revisión de la literatura del periodo 2021–2026 sobre educación fotovoltaica en universidades muestra que estos proyectos desarrollan competencias técnicas mediante aprendizaje basado en proyectos y bancos didácticos, pero que comparten vacíos recurrentes: la ausencia de marcos validados de evaluación de competencias, la integración apenas implícita de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la escasa documentación de resultados de aprendizaje, particularmente en las universidades tecnológicas latinoamericanas (Casado Ramírez et al., 2024; Jáuregui Wade et al., 2025; Marangoni et al., 2023; Castiblanco Forero et al., 2024; Forbes & Lord, 2023; Amalu et al., 2025). Además, la formación en sistemas fotovoltaicos aislados suele desarrollarse mediante simulaciones o prácticas de corta duración, lo que limita la participación del estudiante en procesos completos de dimensionamiento, selección de equipos y evaluación del desempeño real.

El problema es, en esencia, de ingeniería industrial. La disciplina se ocupa de diseñar, mejorar y optimizar sistemas que integran recursos para producir un resultado con eficiencia, y la elección de componentes de un sistema fotovoltaico aislado reúne sus herramientas características: el análisis de decisión multicriterio para elegir entre alternativas con criterios técnicos y económicos en conflicto (Sasikumar, 2019), la gestión de la energía y de los recursos, el análisis tecnoeconómico y la gestión de la vida útil de los activos. La sostenibilidad, además, se ha consolidado como competencia central del perfil del ingeniero industrial (Koch et al., 2023). Por ello, el sistema fotovoltaico no es solo objeto de la ingeniería eléctrica, sino un caso idóneo para ejercitar competencias de ingeniería industrial.

Aprendizaje basado en proyectos y competencias. El aprendizaje basado en proyectos mejora de forma medible el aprendizaje frente al formato tradicional de clase y laboratorio, al desplazar el proceso hacia las necesidades del estudiante y al desarrollar las competencias que exigen los marcos de



acreditación de ingeniería (Misoc et al., 2015). En la formación de ingenieros se combina con la educación basada en competencias para articular conocimiento técnico, trabajo en equipo y conciencia ambiental (Bezerra et al., 2021). En energías renovables, experiencias con vehículos y sistemas solares reales evidencian mejoras en la comprensión de principios eléctricos y en las habilidades prácticas, y fortalecen la preparación para el sector solar (Álvarez Ariza & Olatunde-Aiyedun, 2023; Yunesman et al., 2025; Silvestre, 2022; Amalu et al., 2025).

Controladores PWM frente a MPPT. El controlador de carga regula y gestiona el flujo de energía entre el panel y el arreglo de la batería, y la protege de la sobrecarga y la sobredescarga. Los controladores con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) operan el panel en su punto óptimo mediante un convertidor de corriente directa, con eficiencias de conversión cercanas al 98 % (Tan et al., 2020), y entregan más energía que los controladores por modulación de ancho de pulso (PWM), que conectan el panel casi directamente a la batería (Abdul Rahman et al., 2020). La diferencia es decisiva cuando la tensión de potencia máxima del panel supera ampliamente la de una batería de 12 V.

La batería como factor limitante. En los sistemas aislados, la batería de plomo-ácido regulada por válvula domina por su costo y disponibilidad. Su vida en ciclos depende fuertemente de la profundidad de descarga: un mismo banco puede ofrecer del orden de 3 500 ciclos al 10 % de descarga, pero solo algunos cientos de ciclos al 50 %, y se degrada aceleradamente más allá del 80 % (Karaman, 2024; Dorel et al., 2023). Reducir la profundidad de descarga y limitar la corriente de carga prolongan la vida útil (Delgado-Sánchez & Lillo-Bravo, 2020; Dufo-López et al., 2021), por lo que el dimensionamiento del banco condiciona tanto la energía diaria disponible como la durabilidad del activo. Desde la ingeniería industrial, se trata de un problema de gestión de activos: la decisión operativa determina el costo por ciclo y la reposición del equipo.

Pertinencia para la ingeniería industrial. La selección entre equipos con criterios en conflicto —rendimiento, compatibilidad, costo y durabilidad— corresponde al análisis de decisión multicriterio, ampliamente aplicado a la selección de componentes fotovoltaicos (Sasikumar, 2019). A ello se suman la gestión de la energía y de los recursos, el análisis técnico, económico y la gestión de la vida útil de los activos. La literatura confirma que la sostenibilidad y estas competencias de decisión son ya centrales

en la formación del ingeniero industrial y se desarrollan mejor mediante proyectos reales y estudios de caso (Koch et al., 2023; Sangwan & Venugopal, 2022; Kuo & Chang, 2014).

Esta experiencia se desarrolló en el marco del Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de la Investigación y el Posgrado del Pacífico (Programa Delfin), cuya actividad central es el Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico, una estancia en la que estudiantes de distintas instituciones se integran a proyectos dirigidos por investigadores de trayectoria reconocida (López Cortez & Estrada Álvarez, 2023). Para 2024 el programa agrupaba a más de trescientas instituciones de educación superior de México y otros países (Programa Interinstitucional..., 2024). Tres estudiantes del programa —dos de Ingeniería Industrial y uno de Ingeniería Mecatrónica de 2 estados de la República mexicana— se integraron al proyecto, lo que permitió articular la evaluación técnica con el desarrollo de competencias y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El recurso empleado fue un banco didáctico de bajo costo —una microinfraestructura fotovoltaica aislada tipo palapa instalada en el campus— que reproduce un sistema real y permite medir, conectar y dimensionar (Marangoni et al., 2023; Castiblanco Forero et al., 2024). Esta infraestructura ya había sido caracterizada como laboratorio vivo en un trabajo previo de los autores, en el que se identificó que la capacidad de almacenamiento limitaba el aprovechamiento energético (Delgado Arcos et al., 2026). El presente artículo retoma esa infraestructura y ese diagnóstico para mejorar la disponibilidad de la energía que la palapa proporciona a su perfil de carga, a través de dos preguntas de ingeniería con valor formativo: (a) ¿qué configuración de controlador e inversor, entre los componentes disponibles, aprovecha mejor la energía para alimentar una computadora portátil con cargadores e iluminación?, y (b) ¿qué cambios de componente, justificados técnicamente, incrementan la energía disponible, en particular para la operación nocturna? El objetivo fue mejorar la disponibilidad de la energía de la palapa mediante una evaluación multicriterio de la configuración de controlador e inversor y la propuesta de los cambios necesarios, a partir de los datos de placa y las fichas técnicas, en el marco del aprendizaje basado en proyectos. Con ello, el trabajo articula de manera simultánea tres dimensiones que la literatura rara vez integra —la evaluación técnica multicriterio de componentes, el desarrollo de competencias de ingeniería industrial y su alineación explícita con los Objetivos de Desarrollo Sostenible— en una universidad tecnológica mexicana.

METODOLOGÍA

Enfoque, tipo y diseño. Se adoptó un enfoque descriptivo-aplicado, de alcance no experimental y transversal, mediante un estudio de caso de carácter técnico-educativo bajo el enfoque de aprendizaje basado en proyectos, desarrollado sobre un banco didáctico con estudiantes del Programa Delfin como participantes. La evaluación fue analítica: se contrastaron diez configuraciones contra criterios de ingeniería a partir de los datos de placa y de las fichas técnicas de cada componente, complementados con mediciones eléctricas de verificación en el banco.

Ubicación y participantes. El banco se ubica en la Universidad Tecnológica de Tecamachalco (Puebla, México; 18.86° N, 97.73° O; 2 013 m s. n. m.), en un entorno semiurbano. Participaron tres estudiantes del Programa Delfin durante el XXXI Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico (2026): dos de Ingeniería Industrial y uno de Ingeniería Mecatrónica.

Recurso solar del sitio. De acuerdo con el Global Solar Atlas (Banco Mundial/Solargis, 2026), el sitio recibe una irradiación horizontal global de 2 282 kWh/m² al año —equivalente a 6.25 horas solares pico diarias— y una irradiación sobre plano inclinado al ángulo óptimo (22°) de 2 431 kWh/m² al año (6.66 horas solares pico), con una producción fotovoltaica específica de 1 929 kWh/kWp al año (Tabla 1). Este recurso, notablemente alto, implica que la generación no constituye el factor limitante del sistema, sino el almacenamiento.

Tabla 1. Recurso solar del sitio de estudio (Puebla, México). Fuente: Global Solar Atlas (Banco Mundial/Solargis, 2026).

Parámetro	Valor
Irradiación horizontal global (GHI)	2 282 kWh/m ² ·año (6.25 HSP/día)
Irradiación sobre plano inclinado óptimo (22°)	2 431 kWh/m ² ·año (6.66 HSP/día)
Irradiación normal directa (DNI)	2 452 kWh/m ² ·año
Producción fotovoltaica específica (PVOUT)	1 929 kWh/kWp·año
Inclinación óptima / azimut	22° / 180° (sur)
Temperatura del aire (media anual)	16.8 °C
Altitud / coordenadas	2 013 m s. n. m.; 18.86° N, 97.73° O

Componentes. Arreglo de dos paneles policristalinos de 250 W (V_{mp} 30.12 V; I_{mp} 8.30 A; I_{sc} 8.65 A; V_{oc} ≈ 37 V); batería AGM EPCOM PL-18-12 (12 V; 18 Ah; 216 Wh; corriente de carga máxima 5.4 A). Controladores evaluados: EPEVER LS2024EU (PWM, 20 A), genérico (PWM, 100 A), PowMr



POW-M25-PRO (MPPT, 25 A), PowMr POW-Keeper1230 (MPPT, 30 A) y PowMr Pstar-60A (PWM, 60 A). Inversores: EPEVER IPower IP350-11 (onda sinusoidal pura; 280 W continuos / 350 W durante 15 min / 750 W pico; $\eta \approx 90\%$; consumo en vacío ≈ 8 W; corte por bajo voltaje a 10.8 V) e inversor genérico de 1000 W ($\eta \approx 85\%$; consumo en vacío ≈ 12 W). Para evaluar la ampliación del almacenamiento se consideró además una batería AGM-VRLA de 40 Ah, seleccionada y adquirida para el sistema (Linkedpro LK4012; 12 V; 40 Ah en régimen de 10 h—42.8 Ah en 20 h—; 480 Wh; corriente máxima de carga 12 A, equivalente a 0.3 C; tensión de flotación 13.5–13.8 V y tensión cíclica 14.4–15.0 V; vida de diseño en flotación de 10 años a 25 °C; certificación UL MH62092), cuyos datos de placa se tomaron de su ficha técnica (Linkedpro, 2023).

Perfil de carga. 80 W de corriente alterna de 7:00 a 17:00 h (computadora portátil y cargadores de teléfono) y una barra de iluminación de 10 W de 18:00 a 6:00 h.

Criterios de evaluación. (1) compatibilidad de tensión: tensión de circuito abierto del arreglo frente a la tensión máxima de entrada del controlador, considerando conexión en serie y en paralelo; (2) aprovechamiento de los paneles según la tecnología del controlador y su límite de potencia de entrada en 12 V; (3) dimensionamiento del inversor respecto a la batería; (4) autonomía y profundidad de descarga, corregidas por el régimen de descarga (efecto Peukert) con la tabla de potencia constante de la ficha de la batería; y (5) compatibilidad de la corriente de carga: corriente que el arreglo, a través del controlador, puede entregar al banco frente a la corriente máxima de carga admisible de la batería según su ficha técnica.

Modelo de cálculo. En el lado de consumo, la potencia que el inversor demanda de la batería se modeló mediante un balance de potencia con dos términos —las pérdidas de conversión, proporcionales a la carga, y el consumo en vacío del inversor:

$$P_{CC} = \frac{P_{CA}}{\eta} + P_{vacío} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde P_{CC} es la potencia demandada a la batería (W), P_{CA} la potencia útil en corriente alterna (W), η la eficiencia de conversión del inversor y $P_{vacío}$ su consumo sin carga (W). La corriente entregada por la batería se obtuvo de la ley de la potencia eléctrica, con $V = 12$ V:

$$I = \frac{P_{CC}}{V}$$

Ecuación 2

y la energía extraída de la batería en cada intervalo, como el producto de la potencia por su duración:

$$E = P_{CC} \cdot t$$

Ecuación 3

En el lado de carga, la corriente que el controlador puede entregar al banco se estimó como el mínimo entre su corriente nominal y la que limita la potencia fotovoltaica disponible:

$$I_{carga} = \min\left(I_{nom}, \frac{P_{FV}}{V}\right)$$

Ecuación 4

y se contrastó con la corriente máxima de carga admisible de la batería (0.3 C, según su ficha). Finalmente, la profundidad de descarga se obtuvo como el cociente entre la energía demandada y la energía nominal del banco, expresada como porcentaje:

$$DoD = \frac{E_{noche}}{E_{banco}} \times 100\%$$

Ecuación 5

Los cálculos se realizaron en una hoja de cálculo (Microsoft Excel).

Instrumentos y mediciones. Para la verificación se emplearon un multímetro digital de verdadero valor eficaz (true RMS) UNI-T UT61D+ (6000 cuentas; categoría de seguridad CAT III 1000 V) para tensión y corriente, y un medidor de potencia (vatímetro) comercial portátil para el consumo efectivo.

Consideraciones éticas. Participación voluntaria, uso exclusivo de los datos con fines académicos y anonimato de los participantes.

Criterios de inclusión y exclusión. En la evaluación técnica se incluyeron las configuraciones conectables al arreglo y a la batería con los equipos disponibles en el banco, y se excluyeron las incompatibles por tensión. Respecto a los participantes, se incluyó a los estudiantes del Programa Delfin asignados al proyecto que aceptaron participar y completaron la estancia de verano; no se excluyó a ninguno.

Mapeo de competencias. El componente formativo se abordó de manera cualitativa: las competencias que el proyecto permite ejercitar se mapearon contra una taxonomía propia (dominios técnico, metodológico, social y de sostenibilidad), los niveles de la taxonomía de Bloom y las metas de los

Objetivos de Desarrollo Sostenible. No se aplicaron instrumentos de medición de competencias (por ejemplo, rúbricas pre y post o encuestas), por lo que este mapeo es conceptual y no constituye una medición del aprendizaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

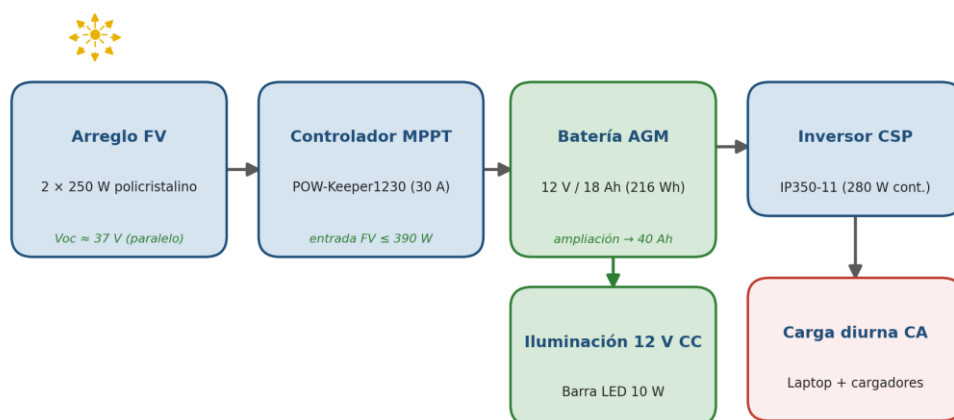
Evaluación de las diez configuraciones

La Tabla 2 resume la evaluación. Solo los controladores con tolerancia de tensión suficiente en conexión paralelo resultaron viables; el Pstar-60A quedó descartado porque su límite de entrada en 12 V es inferior a la tensión de circuito abierto de los paneles. Entre los compatibles, los controladores MPPT aprovecharon una potencia por panel notablemente mayor que los PWM. El inversor IP350-11, de onda sinusoidal pura y bajo consumo en vacío, resultó superior al genérico de 1000 W, sobredimensionado para una batería de 18 Ah. La configuración óptima entre los componentes disponibles combinó el controlador MPPT PowMr POW-Keeper1230 con el inversor IP350-11, pues admite la tensión de los paneles con holgura, ofrece la mayor entrada fotovoltaica en 12 V y protege el banco con su corte por bajo voltaje; no obstante, por entregar hasta 30 A, su corriente de carga debe configurarse al límite admisible de la batería (0.3 C). La Figura 1 presenta la arquitectura del banco con la configuración seleccionada y los dos cambios propuestos.

Tabla 2. Evaluación de las diez configuraciones controlador × inversor (batería de 18 Ah; paneles en paralelo).

#	Controlador (tipo)	Inversor	Compatib. paneles	Aprovech. paneles	Evaluación global
1	EPEVER LS2024EU (PWM, 20 A)	IP350-11	Sí (paralelo)	~116 W/panel (PWM)	Aceptable
2	EPEVER LS2024EU (PWM, 20 A)	Genérico 1000 W	Sí (paralelo)	~116 W/panel (PWM)	Deficiente (inversor sobredim.)
3	Genérico (PWM, 100 A)	IP350-11	Sí (paralelo)	~116 W/panel (PWM)	Aceptable (carga 100 A excesiva)

#	Controlador (tipo)	Inversor	Compatib. paneles	Aprovech. paneles	Evaluación global
4	Genérico (PWM, 100 A)	Genérico 1000 W	Sí (paralelo)	~116 W/panel (PWM)	Deficiente
5	PowMr POW-M25-PRO (MPPT, 25 A)	IP350-11	Sí (paralelo)	~245 W/panel; recorta a 300 W	Buena
6	PowMr POW-M25-PRO (MPPT, 25 A)	Genérico 1000 W	Sí (paralelo)	~245 W/panel; recorta a 300 W	Media
7	PowMr POW-Keeper1230 (MPPT, 30 A)	IP350-11	Sí (con margen)	~245 W/panel; recorta ~110 W	ÓPTIMA
8	PowMr POW-Keeper1230 (MPPT, 30 A)	Genérico 1000 W	Sí (con margen)	~245 W/panel; recorta ~110 W	Media
9	PowMr Pstar-60A (PWM, 60 A)	IP350-11	No (Voc 37 V > 23 V)	No opera	Inviabile
10	PowMr Pstar-60A (PWM, 60 A)	Genérico 1000 W	No (Voc 37 V > 23 V)	No opera	Inviabile



cambio propuesto
Flujo de potencia: generación → regulación → almacenamiento → conversión/consumo

Figura 1. Arquitectura del banco didáctico fotovoltaico aislado con la configuración seleccionada (controlador MPPT POW-Keeper1230 + inversor IP350-11) y los dos cambios propuestos (en verde).



Elaboración propia.

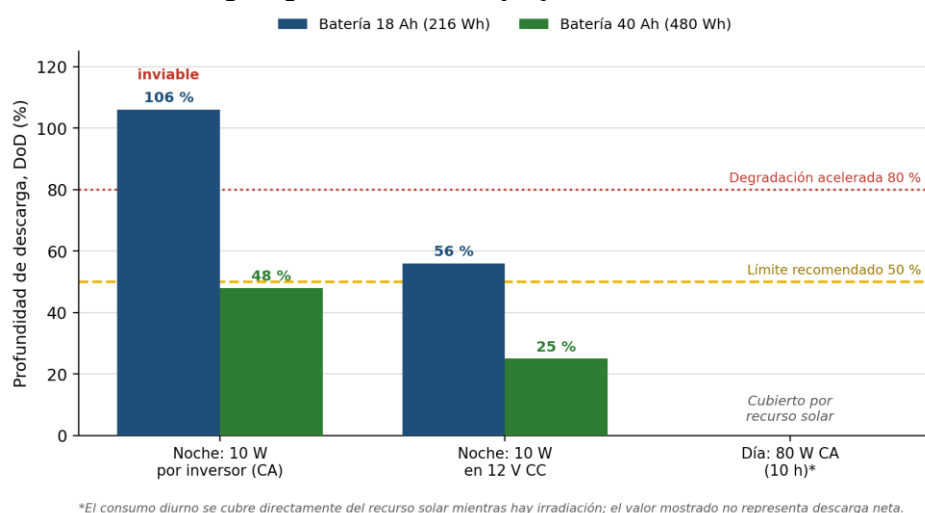
La batería como factor limitante del perfil de carga

Con el recurso solar del sitio (Tabla 1), un controlador MPPT sobre este arreglo genera del orden de 2 600 a 3 100 Wh diarios, de modo que la carga diurna de corriente alterna (cercana a 970 Wh) se cubre directamente con el recurso solar mientras hay irradiación; la generación, por tanto, no limita el sistema. El problema aparece de noche: alimentar una barra de iluminación de baja potencia a través del inversor obliga a sumar su consumo en vacío, que casi duplica la carga útil y excede la capacidad de la batería de 18 Ah. La Tabla 3 y la Figura 2 muestran la profundidad de descarga por escenario y capacidad: con el inversor en operación nocturna, el escenario resulta inviable, pues la energía requerida supera la capacidad total del banco. Además, la batería gobierna también el lado de la carga: el controlador MPPT seleccionado, de 30 A nominales, puede entregar una corriente muy superior a la corriente máxima de carga admisible del banco —5.4 A para 18 Ah y 12 A para 40 Ah—, por lo que su corriente de carga debe limitarse en la configuración del controlador al valor de la ficha de la batería para evitar el gaseo y la degradación acelerada. La compatibilidad de la corriente de carga es, por tanto, un criterio de selección tan determinante como la tensión o el dimensionamiento del inversor.

Tabla 3. Profundidad de descarga (DoD) por escenario y capacidad de batería.

Escenario de carga	Batería 18 Ah (216 Wh)	Batería 40 Ah (480 Wh)
Día: 80 W CA, 7–17 h (10 h) $\approx$ 969 Wh	Cubierto por recurso solar; sin respaldo nublado	Cubierto por recurso solar; mayor margen
Noche: 10 W por inversor (CA), 12 h $\approx$ 229 Wh	106 % DoD — inviable	48 % DoD — viable
Noche: 10 W en 12 V CC directo, 12 h $\approx$ 120 Wh	56 % DoD — límite	25 % DoD — holgado
Corriente de carga máx. segura del banco	5.4 A ($\sim$ 78 W) — riesgo alto	$\sim$ 12 A ($\sim$ 144 W) — riesgo bajo

Figura 2. Profundidad de descarga según el escenario de operación nocturna y la capacidad del banco. Los dos cambios propuestos (iluminación a 12 V CC y batería de 40 Ah) trasladan la operación a un intervalo de descarga seguro. Elaboración propia.



Configuración óptima y cambios propuestos

Del análisis se derivan dos cambios que vuelven el sistema viable y duradero para el perfil propuesto.

Cambio 1: iluminación en 12 V de corriente directa. Sustituir la barra de corriente alterna por una barra de diodos emisores de luz de 12 V conectada a la salida de carga del controlador o directamente a la batería con fusible elimina el consumo en vacío del inversor; el consumo nocturno disminuye de manera notable y la operación nocturna pasa de inviable a operable, con un costo prácticamente nulo.

Cambio 2: ampliación del banco a 40 Ah. Aun resuelto lo anterior, 18 Ah dejan la noche al límite y permiten que el controlador MPPT inyecte más corriente que la tolerada por la batería. La unidad seleccionada y adquirida para ampliar el almacenamiento es una batería AGM-VRLA de 40 Ah (Linkedpro LK4012; 12 V; 40 Ah; 480 Wh nominales; corriente máxima de carga de 12 A, equivalente a 0.3 C); reduce la profundidad de descarga nocturna a un intervalo holgado, eleva la corriente de carga segura y aporta margen para días nublados. En cualquier caso, la corriente de carga del controlador debe limitarse en su configuración al valor admisible de la batería; en el POW-Keeper1230, ello implica fijar un límite de carga de 12 A y los umbrales de tensión que indica la ficha de la unidad —carga cíclica de 14.4–15.0 V, flotación de 13.5–13.8 V y corte por baja tensión en torno a 10.8 V (Linkedpro, 2023)—. La Figura 2 evidencia el efecto sobre la profundidad de descarga. Asimismo, la curva de vida en ciclos frente a la profundidad de descarga de la ficha de la unidad seleccionada respalda la mejora en durabilidad: operar la noche en torno al 25 % de descarga en corriente directa —y por debajo del 50 % en el escenario de corriente alterna— mantiene el banco lejos de la región de descarga profunda y multiplica los ciclos útiles respecto de exigir al banco de 18 Ah una descarga superior al 100 % (Linkedpro, 2023). La batería es, por tanto, el único componente cuyo cambio mejora de raíz el desempeño del sistema.

Discusión

El sistema presenta un desbalance estructural entre la capacidad de generación y la de almacenamiento, condición que en aplicaciones convencionales se consideraría una limitación de diseño, pero que en el contexto educativo adquiere valor formativo al hacer observable el efecto del dimensionamiento energético. Los resultados coinciden con Cabrera et al. (2024), quienes reportan que los sistemas fotovoltaicos educativos aislados suelen estar restringidos por el almacenamiento, lo que impacta directamente en la energía útil disponible; y con antecedentes en los que la interacción con sistemas reales favorece la comprensión de variables eléctricas más allá de los modelos simulados (Álvarez Ariza & Olatunde-Aiyedun, 2023).

El uso de un controlador PWM introduce pérdidas adicionales al no operar en el punto de máxima potencia, lo que reduce la eficiencia global frente a configuraciones MPPT (Tan et al., 2020; Abdul Rahman et al., 2020). El análisis del inversor muestra, además, que su capacidad nominal no determina



la capacidad operativa del sistema, gobernada fundamentalmente por el almacenamiento disponible; un inversor sobredimensionado para una batería pequeña llevaría a descargas profundas y a una vida útil menor.

La justificación de los cambios propuestos se apoya en la relación entre la profundidad de descarga y la vida útil del banco: operar a menor descarga prolonga sustancialmente la vida en ciclos (Karaman, 2024; Dorel et al., 2023; Dufo-López et al., 2021), y la consideración de los procesos de degradación modifica de forma relevante el análisis técnico y económico de estos sistemas (Delgado-Sánchez & Lillo-Bravo, 2020). En consecuencia, la decisión de operación —la profundidad de descarga objetivo— es, antes que un parámetro eléctrico, una decisión de gestión de activos.

Resolver el problema de selección y dimensionamiento como un caso de decisión multicriterio ejercita competencias propias de la ingeniería industrial —gestión de la energía y los recursos, análisis técnico y económico, gestión de activos y mejora— y abarca los niveles superiores de la taxonomía de Bloom, a la vez que contribuye de forma explícita a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible. La Tabla 4 sintetiza este mapeo, que constituye el puente entre el trabajo técnico y el perfil de egreso del ingeniero industrial en las Universidades Tecnológicas. La experiencia es coherente con la evidencia de que el aprendizaje basado en proyectos fortalece competencias laborales en estudiantes de ingeniería industrial vinculados a proyectos solares reales (Yunesman et al., 2025; Sangwan & Venugopal, 2022).

Tabla 4. Mapeo de competencias de ingeniería industrial, nivel cognitivo y Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Competencia de ingeniería industrial	Actividad en el banco didáctico	Nivel (Bloom)	ODS
Gestión de la energía y los recursos	Calcular el balance energético y detectar el desperdicio de capacidad instalada	Aplicar / Analizar	7, 12
Análisis de decisión multicriterio	Comparar y jerarquizar las diez configuraciones por criterios en conflicto	Analizar / Evaluar	9, 12
Análisis tecnoeconómico	Valorar la relación costo-beneficio y la eficiencia del recurso solar	Evaluar	7, 8, 12
Gestión de activos y vida útil	Definir la profundidad de descarga objetivo que minimiza el costo por ciclo	Evaluar / Crear	9, 12
Mejora y comunicación técnica	Proponer cambios justificados y documentar resultados en equipo	Crear	4, 17

La novedad del trabajo no reside en un componente, sino en el modelo: articula, sobre una microinfraestructura de bajo costo, la evaluación técnica multicriterio, el desarrollo de competencias de ingeniería industrial y su alineación explícita con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, combinación que la revisión de la literatura señala como poco frecuente en las universidades tecnológicas latinoamericanas. Su valor práctico es doble: ofrece una regla de diseño transferible —dimensionar a la batería— y un recurso replicable para la docencia.

Entre las limitaciones se identifican la naturaleza analítica de la evaluación —basada en datos de placa y fichas técnicas—, la baja capacidad de almacenamiento, la dependencia de la irradiancia solar y la ausencia de un sistema de adquisición de datos en tiempo real. Asimismo, la dimensión formativa se documenta mediante un mapeo cualitativo de competencias y no a través de una medición con instrumentos pre y post, lo que se plantea como trabajo futuro.

El trabajo futuro contempla la validación del instrumento de evaluación de competencias, la instrumentación del banco con un sistema de adquisición de datos y la evaluación de un banco de mayor capacidad o de una arquitectura a 24 V.

CONCLUSIONES

Para mejorar la disponibilidad de la energía que proporciona la palapa a su perfil de carga, la configuración óptima entre los componentes disponibles es el controlador con seguimiento del punto de máxima potencia PowMr POW-Keeper1230 con el inversor de onda sinusoidal pura IP350-11. El hallazgo central, transferible como regla de diseño, es que el sistema debe dimensionarse a la batería —tanto en la energía disponible y la profundidad de descarga como en la corriente de carga admisible—, y no a la potencia nominal del inversor ni del arreglo; en consecuencia, la corriente de carga del controlador debe ajustarse al máximo que tolera el banco.

Para el perfil propuesto, dos decisiones lo vuelven viable y duradero: alimentar la iluminación nocturna en 12 V de corriente directa y ampliar el banco de almacenamiento, con lo que la operación nocturna pasa de inviable a un intervalo seguro de descarga. La batería resulta así el único componente cuyo cambio mejora de raíz el desempeño del sistema para este perfil de carga.

Como recurso didáctico bajo el enfoque de aprendizaje basado en proyectos, el banco permitió a los estudiantes del Programa Delfín ejercitar competencias de dimensionamiento, selección de equipos,



medición y evaluación de la sostenibilidad, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 4, 7, 9, 12 y 13. La experiencia muestra que una microinfraestructura de bajo costo, operada como laboratorio vivo, articula la docencia, la sostenibilidad y la aplicación técnica en un contexto educativo real, y constituye un modelo replicable para instituciones tecnológicas con características similares.

Contribución de los autores (CRediT)

Roberto Cristian Delgado Arcos: conceptualización, supervisión, administración del proyecto y redacción (revisión y edición). Brayan Hernández Rodríguez: investigación, análisis formal y redacción (borrador). Edgar Adan Rubio Olivares: metodología, curación de datos y visualización. Elizabeth Michel Cruz López: investigación, validación y redacción (borrador). Alberto Vera Camacho: validación y redacción (revisión y edición).

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo específico. Los autores reconocen el apoyo institucional de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco y del Programa Delfín para la realización de la estancia de verano de investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los estudiantes de noveno cuatrimestre del Programa Educativo de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco por su colaboración, así como a quienes facilitaron el acceso al banco didáctico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul Rahman, N. H., Omar, A. M., & Mat Saat, E. H. (2020). Design and development of three stages maximum power tracking solar charge controller. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18(3), 1270–1278. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1270-1278>
- Álvarez Ariza, J., & Olatunde-Aiyedun, T. G. (2023). Bringing project-based learning into renewable and sustainable energy education: A case study on the development of the electric vehicle EOLO. *Sustainability*, 15(13), 10275. <https://doi.org/10.3390/su151310275>



- Amalu, E. H., Adebayo, D. S., & Chong, P. L. (2025). Development of a photovoltaic (PV) solar energy technology training module for STEM undergraduates for solar energy sector deployment. *Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 2(1), 33–54. <https://doi.org/10.12973/jmste.2.1.33>
- Bezerra, N. R. A., Miranda, H. L. de, & Farias Filho, J. R. de. (2021). Engineers' education in digital era. *Conhecimento & Diversidade*, 13(31), 205–224. <https://doi.org/10.18316/rcd.v13i31.9312>
- Cabrera, J. M., Burgos, A., De Jesús, M. J., Vázquez, D., Guadalupe, L., Otero, J., González, E. J., Olivieri, A., Valentín, A., & Ortiz, E. (2024). Proyecto Luz Verde UPRM: Project-based-learning education on energy using off-grid PV systems. En *2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 1433–1437). IEEE. <https://doi.org/10.1109/pvsc57443.2024.10749052>
- Casado Ramírez, E. del J., Guillen Taje, J. L., Martín Canché, B. del R., Naal Ocampo, A., & Velasco Viveros, G. (2024). Implementación de un módulo didáctico para el aprendizaje de sistemas fotovoltaicos autónomos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 4820–4835. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9038
- Castiblanco Forero, L. A., Higuera, F., & López Martínez, G. A. (2024). Diseño de banco de pruebas para la enseñanza de energías renovables en la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central (ETITC). *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/paper.3883>
- Delgado Arcos, R. C., Blanco Flores, L. R., Rodríguez Centeno, D., & Andrade Rodríguez, H. (2026). Evaluación Técnica y Formativa de una Microinfraestructura Fotovoltaica Off-Grid como Laboratorio Vivo en una Universidad Tecnológica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 10(2), 9404-9418. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2.23947
- Delgado-Sánchez, J.-M., & Lillo-Bravo, I. (2020). Influence of degradation processes in lead–acid batteries on the technoeconomic analysis of photovoltaic systems. *Energies*, 13(16), 4075. <https://doi.org/10.3390/en13164075>



- Dorel, S., Osman, M. G., & Strejoiu, C.-V. (2023). *Exploring optimal charging strategies for off-grid solar PV systems: A comparative study on battery storage techniques* [Preprint]. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0990.v1>
- Dufo-López, R., Cortés-Arcos, T., & Artal-Sevil, J. S. (2021). Comparison of lead-acid and Li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems. *Applied Sciences*, 11(3), 1099. <https://doi.org/10.3390/app11031099>
- Forbes, M. H., & Lord, S. M. (2023). A place-based sustainability approach to learning about photovoltaic solar energy. *Trends in Higher Education*, 2(2), 306–319. <https://doi.org/10.3390/higheredu2020017>
- Global Solar Atlas. (2026). *Solar resource and photovoltaic power potential: Puebla, Mexico* [Reporte de datos]. World Bank Group/Solargis. <https://globalsolaratlas.info/>
- Jáuregui Wade, L., Canales Obeso, J. J., Oropeza Tosca, D. R., & Notario-Priego, R. (2025). Árbol solar: Innovación educativa y ambiental en el Instituto Tecnológico de Villahermosa. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(3), 10442–10451. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18771
- Karaman, C. (2024). Aging retardation of lead-acid batteries by adjusting charge controller threshold values in off-grid photovoltaic system. *Archives of Advanced Engineering Science*, 1–10. <https://doi.org/10.47852/bonviewaaes42024076>
- Koch, V., Berger, M., & Omazic, A. (2023). Sustainability education in the field of industrial engineering and management: Theoretical concepts and practical applications. En *Proceedings of the International Scientific Conference on Industrial Systems (IS'23)* (pp. 261–266). Faculty of Technical Sciences. https://doi.org/10.24867/is-2023-t6.1-3_05241
- Kuo, C.-G., & Chang, C.-C. (2014). Building professional competencies indices in the solar energy industry for the engineering education curriculum. *International Journal of Photoenergy*, 2014, 963291. <https://doi.org/10.1155/2014/963291>
- Linkedpro by Epcom. (2023). *Batería AGM-VRLA LK4012 (12 Vcc, 40 Ah): Hoja de especificaciones* [Ficha técnica]. Epcom.



- López Cortez, J. E., & Estrada Álvarez, M. E. (2023). Retos, estrategias y resultados sostenibles en el programa de verano de investigación DELFÍN 2020: Artesanos del piteado. *Punto Cunorte*, (17), 87–109. <https://doi.org/10.32870/punto.v1i17.173>
- Marangoni, A. C., Lima, O. J. de, & Giolo, C. (2023). Design, construction and validation of a didactic bench prototype for teaching sustainable energy in engineering courses at UEMG. *Concilium*, 23(23), 418–432. <https://doi.org/10.53660/clm-2660-23u54>
- Misoc, F., Ball, T., & Asgill, A. (2015). Project-based curriculum for renewable energy engineering technology. En *2015 ASEE Annual Conference & Exposition* (pp. 1–12). ASEE. <https://doi.org/10.18260/1-2--22379>
- Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de la Investigación y el Posgrado del Pacífico. (2024). *Memoria del XXIX Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2024*. Programa Delfin. <https://www.programadelfin.com.mx/>
- Sangwan, D., & Venugopal, A. (2022). Essentiality of knowing transversal competencies: Towards engineering education sustainability and industry readiness of engineering students. En *Proceedings of the 9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings* (pp. 663–671). Universitat Politècnica de Catalunya. <https://doi.org/10.5821/conference-9788412322262.1347>
- Sasikumar, G. (2019). A review on applications of multi-criteria decision making (MCDM) for solar panel selection. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(2), 11–20. <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr20192>
- Senthil, R. (2022). Recent innovations in solar energy education and research towards sustainable energy development. *Acta Innovations*, 42, 27–49. <https://doi.org/10.32933/actainnovations.42.3>
- Silvestre, S. (2022). Innovation strategies to develop specific professional skills on photovoltaic systems engineering. En *Proceedings of the 8th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'22)* (pp. 2195–2199). Universitat Politècnica de Catalunya. <https://doi.org/10.5821/conference-9788412322262.1324>



- Tan, R. H. G., Er, C. K., & Solanki, S. G. (2020). Modeling of photovoltaic MPPT lead acid battery charge controller for standalone system applications. *E3S Web of Conferences*, 182, 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018203005>
- Yunesman, Ambiyar, & Hermansyah. (2025). Improving students' green energy practical skills through project-based industrial electronics learning for Sustainable Development Goals. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(12), 316–324. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i12.12595>

