

DISEÑO CAD DE UN ESTACIONAMIENTO CON PANELES BIFACIALES Y ESTIMACIÓN DE IMPACTO ENERGÉTICO EN UN CAMPUS UNIVERSITARIO

Cesar Omar Campos Romero¹, Jorge Alberto Cárdenas Magaña² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula

Resumen - La transición hacia fuentes energéticas renovables demanda estrategias aplicables en infraestructura educativa, donde el consumo eléctrico es significativo y las superficies disponibles suelen estar subutilizadas. Este estudio presenta el diseño y evaluación energética de un estacionamiento solar tipo *carport* para el Instituto Tecnológico Superior de Jalisco, Unidad Académica Tamazula, integrando 120 paneles bifaciales Jinko Solar de 575 W cada uno, con potencia instalada de 69 kWp. El objetivo fue estimar su capacidad anual de generación y comparar su aporte frente al consumo eléctrico institucional, utilizando parámetros de irradiación promedio regional (5.0–6.0 kWh/m²·día), performance ratio 0.72–0.82 y ganancia bifacial estimada entre 8–18 %. Se evaluaron tres escenarios de producción: conservador, medio y óptimo. Los resultados indican una producción anual estimada de 123–151 MWh/año, equivalente al 78–96 % del consumo eléctrico promedio reportado en recibos de CFE (156,960 kWh/año). El sistema permitiría reducir costos operativos, disminuir demanda de red y aportar sombra al área asfaltada, lo que contribuye a la mitigación térmica en campus. Además, con un costo aproximado de inversión de 3 MDP, el retorno económico estimado se proyecta entre 6.9 y 12 años, dependiendo del rendimiento real y actualización tarifaria. El prototipo demuestra viabilidad técnica y energética, posicionándose como una solución replicable para infraestructura educativa sostenible, con potencial para incorporar futuras fases como puntos de carga vehicular o monitoreo IoT.

Palabras clave: Energía fotovoltaica; Paneles bifaciales; Estacionamiento solar; Carport PV; Generación distribuida; Eficiencia energética; CAD/BIM; Simulación energética; Sombreado urbano; Infraestructura educativa sostenible.

Abstract- The transition toward renewable energy sources demands practical strategies for educational infrastructure, where electricity consumption is significant and available surfaces are often underutilized.

Documento enviado el 07 de diciembre de 2025

Autores: 1. Cesar Omar Campos Romero, estudiante afiliado al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. Tamazula de Gordiano, Jalisco, 49650. correo: tm.220111437@tamazula.tecmm.edu.mx

2. Jorge Alberto Cárdenas Magaña, profesor investigador afiliado al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. Tamazula de Gordiano, Jalisco, 49650. correo: jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx

This study presents the design and energy assessment of a solar carport parking system for the Instituto Tecnológico Superior de Jalisco, Unidad Académica Tamazula, integrating 120 bifacial Jinko Solar panels of 575 W each, for a total installed capacity of 69 kWp. The objective was to estimate annual energy generation and compare its contribution to the institution's electrical demand, using regional average irradiation values (5.0–6.0 kWh/m²·day), a performance ratio of 0.72–0.82, and an estimated bifacial gain of 8–18%. Three production scenarios were evaluated: conservative, medium, and optimal. Results indicate an annual generation of 123–151 MWh/year, covering 78–96% of the average electricity consumption reported in CFE bills (156,960 kWh/year). The system would reduce operating costs, lower grid dependence, and provide shading for paved areas, contributing to thermal mitigation on campus. With an estimated investment of 3 million MXN, the projected payback period ranges from 6.9 to 12 years, depending on actual performance and tariff updates. The prototype demonstrates technical and energy feasibility and stands as a replicable sustainable solution for educational facilities, with potential for future integration of EV charging points or IoT-based monitoring.

Keywords: Bifacial Photovoltaic Panels; Solar Carport; Energy Efficiency; Renewable Energy; Parking Infrastructure; CAD-BIM Design; Distributed Generation; Annual Energy Yield; PV Performance Ratio; Educational Campus Sustainability

I. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de infraestructura energética sustentable dentro de instituciones educativas ha impulsado el desarrollo de soluciones que permitan optimizar el uso del espacio físico y reducir el consumo eléctrico convencional. Los estacionamientos, generalmente subutilizados, representan superficies amplias con alto potencial para instalar sistemas fotovoltaicos integrados en estructuras de sombreado (*carports*), reduciendo el efecto de isla de calor y generando energía renovable para autoconsumo. En este contexto, el uso de paneles solares bifaciales permite la captación de irradiancia tanto por la cara frontal como posterior, alcanzando incrementos de generación del 8 al 30 % respecto a módulos monofaciales dependiendo del albedo y la altura de instalación [1]

La literatura reciente demuestra el interés por soluciones fotovoltaicas aplicadas a campus universitarios. [2] evaluaron

la capacidad energética de carports solares, registrando producciones cercanas a 98 MWh/año en instalaciones de 500 m²; sin embargo, sus estudios se centraron en módulos convencionales y no en tecnología bifacial. [3] propusieron un esquema metodológico para incorporar energías renovables en instituciones educativas, destacando el análisis de ciclo de vida y la modelación energética, aunque orientado a edificios y no a estacionamientos. Por su parte, [4] demostraron el potencial del modelado CAD/BIM y análisis estructural para cubiertas ligeras, pero sin incorporar evaluación fotovoltaica ni factores bioclimáticos. Este panorama revela tres brechas principales: (1) escasa aplicación de paneles bifaciales en estacionamientos educativos, (2) falta de metodologías integrales que combinen diseño CAD, simulación energética y análisis económico, y (3) carencia de estudios aplicados a consumo real con recibos institucionales.

Ante esta oportunidad, la presente investigación propone el diseño y evaluación energética de un estacionamiento solar para el Instituto Tecnológico Superior de Jalisco Unidad Académica Tamazula, ubicado en Carretera Tamazula-Santa Rosa 329, integrando módulos fotovoltaicos bifaciales en una superficie aproximada de 1,668.28 m². El estudio considerará la irradiación anual promedio del estado de Jalisco (~5.3 kWh/m²/día), estimará la energía generada mediante software (PVWatts/PVsyst) y cálculo analítico, y comparará los resultados con el historial de consumo eléctrico del plantel obtenido en recibos CFE 2024 y 2025 para determinar la reducción potencial de demanda, ahorro económico y disminución de emisiones de CO₂ asociadas. El objetivo final es demostrar la viabilidad técnica-energética del sistema y generar un modelo replicable para futuras implementaciones de infraestructura fotovoltaica educativa.

II. ESTADO DEL ARTE

La literatura reciente sobre sostenibilidad en infraestructura educativa coincide en que el **manejo sustentable del sitio** y la integración de energías renovables son ejes clave para reducir impactos ambientales y mejorar el confort de los usuarios. Hernández-Moreno revisa criterios de diseño sustentable del sitio, resaltando la correcta orientación, el control de islas de calor y el aprovechamiento del paisaje como elementos que condicionan el desempeño energético de cualquier proyecto arquitectónico. [2] En la misma línea, los planes de movilidad universitaria sustentable plantean al estacionamiento no solo como área de aparcamiento, sino como pieza articuladora de movilidad peatonal, ciclovías y transporte público, con problemas recurrentes de saturación vehicular y consumo intensivo de suelo urbano. [3,4]

En el ámbito de la **integración fotovoltaica en campus universitarios**, diversos estudios han demostrado el potencial de aprovechar cubiertas y estacionamientos como superficies activas de generación eléctrica. Proyectos de módulos solares para abastecer parcialmente sistemas de vigilancia o pequeñas cargas institucionales muestran reducciones medibles de consumo de red y emisiones de CO₂, pero a escalas aún modestas. [5,6,7] Estudios de plantas fotovoltaicas conectadas a red, con énfasis en sostenibilidad y eficiencia energética, señalan la necesidad de evaluar no

solo la producción eléctrica, sino también indicadores de ciclo de vida, costos nivelados de energía (LCOE) y beneficios ambientales asociados a la sustitución de energía de origen fósil. [5,8,9]

Dentro de las tecnologías fotovoltaicas, los paneles **bifaciales** se han consolidado como una alternativa de alta eficiencia para aplicaciones donde se busca maximizar el rendimiento energético por área disponible. Estudios recientes sobre modelado y evaluación de módulos PERC y bifaciales demuestran que, para zonas con buena irradiación y condiciones adecuadas de instalación, la tecnología bifacial puede superar a los módulos monofaciales en producción anual debido al aprovechamiento del albedo del suelo y la captación trasera de radiación [8]. Revisiones orientadas al análisis de desempeño resaltan que factores como **albedo, alturas de instalación, ángulo de inclinación, distancia entre filas y sombreado proyectado** son determinantes para incrementar la ganancia posterior [7–9]. En general, reportes experimentales muestran incrementos del **5 % al 30 %** frente a módulos convencionales, según la configuración geométrica de la estructura y el tipo de superficie reflectante.

En aplicaciones específicas tipo **carport fotovoltaico**, simulaciones numéricas y experiencias de implementación en campus universitarios y centros comerciales señalan que la incorporación de pavimentos claros o superficies reflectantes bajo el arreglo incrementa el rendimiento energético entre 10 % y 20 %, particularmente cuando la altura libre supera los 2.5–3.0 m y la inclinación no reduce la captación trasera [10–13]. Además, se reporta que estas estructuras contribuyen a la mitigación de islas de calor y permiten su integración con estaciones de recarga para vehículos eléctricos, lo cual las posiciona como infraestructura estratégica para transiciones energéticas urbanas [14–16].

En el ámbito tecnológico, los avances industriales recientes han impulsado módulos N-Type bifaciales dual-glass, con potencias comerciales de 560–580 W, eficiencia frontal superior al 22 %, degradación ≤ 0.40 % anual y garantía lineal a 30 años, como el modelo Tiger Neo 72HL4-BDV de Jinko Solar [JK-M575N-72HL4-BDV_FichaTecnica]. Estas características reducen el número de módulos requeridos por kWp instalado, factor particularmente ventajoso cuando el espacio es limitado, como en estacionamientos consolidados de instituciones educativas.

Paralelamente, la literatura sobre **modelado y simulación** enfatiza el rol de las herramientas CAD, BIM y los análisis por elementos finitos (FEA) como soporte para el diseño de cubiertas ligeras y estructuras de soporte fotovoltaico. Se ha demostrado que los flujos de trabajo CAD/BIM permiten integrar desde etapas tempranas la geometría de la estructura, el acomodo de los módulos y la compatibilidad con criterios de accesibilidad y seguridad en estacionamientos. [14,15] Por su parte, el análisis estructural asistido por computadora aporta información sobre esfuerzos, deformaciones y requisitos de cimentación, considerando cargas de viento y peso propio de los módulos, lo que es esencial para garantizar la viabilidad constructiva de carports en zonas con normativas estructurales específicas

Más recientemente, algunos autores han propuesto **marcos metodológicos integrales** que combinan simulación estructural, simulación energética y evaluación económica para proyectos fotovoltaicos complejos. Estos trabajos incorporan herramientas de cálculo de recurso solar (como bases de datos climáticas satelitales), modelos de rendimiento del sistema fotovoltaico y análisis financieros que incluyen costos de inversión, operación y mantenimiento. [5,7,8] Sin embargo, la mayoría se enfoca en plantas a gran escala o en cubiertas de edificios, y son escasos los estudios que aplican esta visión holística a estacionamientos educativos de tamaño medio con tecnología bifacial.

En el contexto específico de la región de Jalisco, estudios recientes de modelado de eficiencia energética de paneles solares empleando datos de irradiación de la plataforma POWER de la NASA han mostrado que localidades con irradiaciones promedio diarias del orden de 5.0–5.5 kWh/m²/día son particularmente favorables para sistemas fotovoltaicos fijos, incluyendo configuraciones bifaciales. [8] Estos hallazgos sugieren que campus como el Instituto Tecnológico Superior de Jalisco, Unidad Académica Tamazula, cuentan con un recurso solar adecuado para justificar la instalación de carports solares bifaciales.

Finalmente, los **registros de consumo eléctrico** de instituciones educativas permiten poner en contexto el impacto potencial de estas soluciones. En el caso del TecMM Unidad Académica Huerta, los recibos de CFE bajo tarifa GDMTO reportan consumos mensuales del orden de 10 000–15 000 kWh y una demanda contratada de 160 kW, con un costo promedio de energía superior a 2.6 MXN/kWh. En la literatura, este tipo de información se utiliza para dimensionar la potencia instalada necesaria para cubrir un porcentaje objetivo de la demanda anual y para estimar reducciones en emisiones de CO₂ asociadas a la matriz eléctrica nacional. [5,10,11]

A partir de esta revisión se identifican varias brechas de conocimiento relevantes para el presente trabajo: (i) existe poca evidencia aplicada a estacionamientos universitarios en clima cálido-subhúmedo que combine criterios bioclimáticos, confort térmico y generación fotovoltaica bifacial; (ii) son escasos los estudios que integran en un mismo flujo de trabajo CAD/BIM, análisis estructural y estimación de energía anual producida por módulos bifaciales en carports; y (iii) se ha abordado de forma limitada la comparación explícita entre la energía generada por estos sistemas y el historial real de consumo de campus específicos, incluyendo su impacto económico y ambiental. El proyecto propuesto busca contribuir a cerrar estas brechas mediante el diseño CAD de un estacionamiento bioclimático con paneles bifaciales, su validación estructural y energética por simulación y la comparación de la energía anual estimada con los recibos de CFE del TSJ Tamazula, evaluando así su potencial de mitigación de consumo y emisiones en un contexto educativo real.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología propuesta se compone de siete etapas secuenciales, diseñadas para conducir el proceso desde el

análisis preliminar del sitio hasta la estimación de generación anual y su comparación con el consumo real del Instituto Tecnológico Superior de Jalisco Unidad Académica Tamazula. Cada fase integra criterios técnicos, energéticos y constructivos con el fin de evaluar la viabilidad del estacionamiento fotovoltaico con paneles bifaciales, manteniendo como base el uso de 120 módulos dentro del área disponible. La figura 1 describe estos pasos.

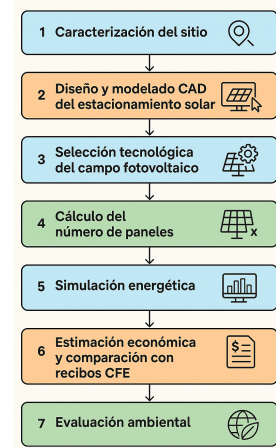


Figura 1. Metodología implementada.

1. Caracterización del sitio. En primera instancia se llevó a cabo la delimitación del área física del estacionamiento mediante mediciones satelitales con Google Earth Pro, obteniendo una superficie aproximada de 1,668 m², lo que permitió definir la distribución vehicular y la zona destinada a paneles, esta vista se muestra en la figura 2.



Figura 1. Delimitación y medición del área del estacionamiento del Instituto Tecnológico Superior de Jalisco, Unidad Académica Tamazula, obtenida mediante Google Earth Pro. Se observa una superficie aproximada de 1,669 m² delimitada para el análisis y diseño del sistema fotovoltaico carport.

2. Diseño y modelado CAD del estacionamiento solar. Posteriormente se desarrolló el modelo geométrico y estructural en software CAD, incorporando circulación vehicular, cajones, vegetación y el módulo fotovoltaico seleccionado; con ello se verificó la posibilidad espacial para instalar 120 paneles bifaciales, distribuidos en filas paralelas para garantizar accesibilidad, ventilación y captación solar adecuada. Tal como se observa en la figura 3.

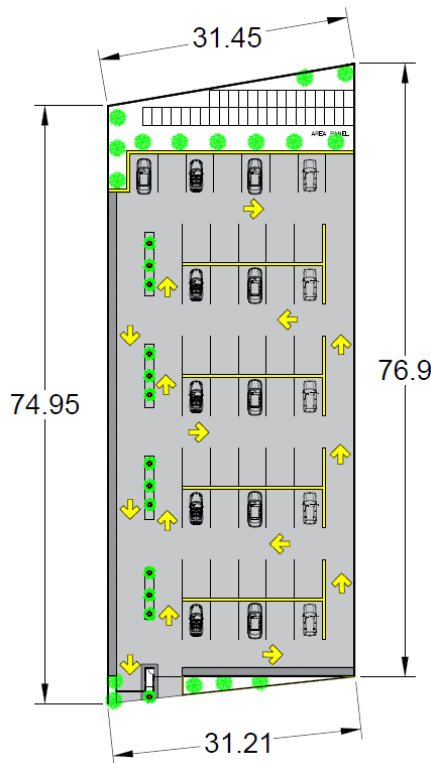


Figura 3. Distribución CAD del estacionamiento con proyección para 120 paneles.

Aunque la medición satelital arroja un área aproximada de 1668.28 m², el diseño CAD considera zonas no pavimentadas y márgenes estructurales para la instalación del carport fotovoltaico, resultando en una superficie útil proyectada ligeramente mayor. Esta variación no afecta el dimensionamiento energético, ya que los módulos se restringen al área cubierta diseñada (≈310 m² para 120 paneles), manteniendo coherencia con el escenario de generación definido.

3. Selección tecnológica del campo fotovoltaico. En la tercera etapa se seleccionó el panel fotovoltaico de referencia (Jinko Solar Tiger Neo N-type 72HL4-BDV, 560–580 W bifacial doble vidrio) cuyas características eléctricas y mecánicas fueron extraídas de su ficha técnica las cuales se aprecian en la figura 4, resaltando eficiencia superior al 22 % y potencia nominal alta que reduce el número total de paneles requeridos.

www.jinkosolar.com

Jinko Solar
Building Your Trust in Solar

Tiger Neo N-type
72HL4-BDV
560-580 Watt

BIFACIAL MODULE WITH
DUAL GLASS

N-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems

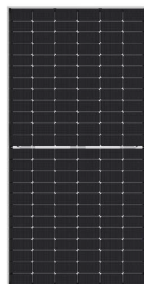


Figura 4. Módulo bifacial Jinko Solar Tiger Neo N-type 72HL4-BDV (560–580 W). Fuente: ficha técnica del fabricante.

4. Cálculo del número de paneles y diseño arquitectónico.

Posteriormente se estimó la potencia total del arreglo mediante la relación $P_{instalada} = N \times P_{módulo}$, llegando a un rango de 67.2 kWp–69.6 kWp para 120 paneles según el modelo seleccionado.

Con el fin de evaluar la integración espacial, estética y funcional del sistema fotovoltaico en el estacionamiento, se elaboraron visualizaciones arquitectónicas mediante modelado tridimensional. Estas representaciones permiten analizar la distribución de los 120 paneles bifaciales sobre la estructura metálica, así como la relación del carport con los cajones vehiculares, circulación peatonal y sombras proyectadas. Las Figuras 5 y 6 muestran la disposición general del arreglo solar y una perspectiva a nivel usuario, lo que facilita interpretar la volumetría, altura libre y potencial de confort térmico bajo cubierta.

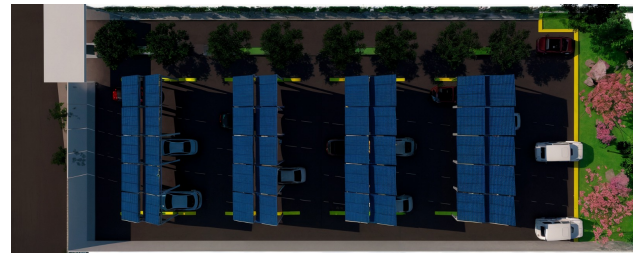


Figura 5. Render con vista superior del carport solar con 120 módulos.



Figura 6. Visualización desde nivel peatonal mostrando estructura y área de estacionamiento.

5. Simulación energética. En la quinta fase se realizó la estimación de generación anual utilizando tres aproximaciones: PVWatts, PVsyst y cálculo manual empleando irradiancia media de la región (≈5.3 kWh/m²/día para Jalisco), considerando factores claves como PR (0.76–0.85 según pérdidas), albedo (0.2–0.35 para concreto/asfalto), inclinación y ganancia bifacial. La energía anual se obtuvo aplicando la ecuación base

$$E_{anual} = P_{instalada} \times H_{anual} \times PR \times (1 + G_{bifacial})$$

Donde:

- $H_{\text{anual}} \text{ Jalisco} \approx 5.3 \text{ kWh/m}^2/\text{día} \rightarrow \approx 1934 \text{ kWh/kWp/año}$
- PR recomendado 0.75–0.85
- Ganancia bifacial esperada = 8–20 %

6. Estimación económica y comparación con recibos CFE.

Posteriormente se realizó la comparación energética contra los recibos CFE, tomando como referencia real dos ciclos de facturación disponibles, con consumos promedio mensuales aproximados entre 10,000–15,000 kWh/mes, según históricos registrados.

7. Evaluación ambiental. A partir de estos datos se proyectó el ahorro potencial en energía y reducción de costo económico anual, junto con el impacto ambiental estimado en términos de CO₂ evitado mediante factores estándar internacionales. Finalmente, se integró un análisis de viabilidad constructiva, mantenimiento y vida útil, considerando inclinación ideal para clima cálido-seco, sombras cercanas, material reflectante bajo módulos y mantenimiento anual. En esta última etapa se establecieron criterios que permitan replicar y escalar el proyecto dentro del campus y en contextos educativos similares.

IV. RESULTADOS

Con base en la propuesta arquitectónica, se plantea un arreglo de 120 módulos bifaciales Jinko Tiger Neo JK-M575N-72HL4-BDV de 575 Wp, con encapsulado vidrio-vidrio y eficiencia frontal $\approx 22\%$ [10]. La potencia instalada del sistema es:

$P_{\text{instalada}} = 120 \times 0.575 \text{ kWp} = 69 \text{ kWp}$

Los módulos se distribuyen en la franja superior del estacionamiento, respetando un trazo aproximado de 31.2–31.4 m de ancho y ~ 75 m de longitud, lo que permite alojar el generador fotovoltaico sin reducir la capacidad de cajones ni afectar la circulación vehicular. A partir de mediciones satelitales se estimó una superficie total del área en $\approx 1286 \text{ m}^2$ (Google Earth) [21], de los cuales alrededor de 310 m^2 corresponden al campo fotovoltaico proyectado, manteniendo espacios disponibles para maniobras, vegetación y zonas peatonales [22].



Figura 7. Disposición de los 120 paneles en la zona vehicular.

Para estimar la energía anual se empleó la expresión:

$E_{\text{anual}} = P_{\text{instalada}} \times H_{\text{anual}} \times PR \times (1 + G_{\text{bifacial}})$

donde H_{anual} es la irradiación anual equivalente en kWh/m²·año, PR el performance ratio del sistema y G_{bif} la ganancia relativa por bifacialidad. Se consideraron valores de irradiación típicos para México central (5.0–6.0 kWh/m²·día, equivalentes a 1825–2190 kWh/m²·año) [23] y rangos de PR de 0.72–0.82, coherentes con sistemas fotovoltaicos bien diseñados (0.75–0.85). [24] La ganancia bifacial se tomó entre 8 % y 18 %, de acuerdo con estudios que reportan aumentos de 5–30 % dependiendo del albedo y la geometría de montaje [25].

A partir de los dos recibos de CFE disponibles se obtuvo un consumo anual de 148,320 kWh (marzo 2023–marzo 2024) y 165 600 kWh (noviembre 2024–noviembre 2025), obtenidos de recibo luz del Tecnológico, por lo que se adoptó un consumo promedio de referencia de 156, 960 kWh/año para el edificio analizado. La Tabla 1 resume los tres escenarios de cálculo.

Tabla 1. Escenarios de generación anual del estacionamiento bifacial (69 kWp).

Escenario	H_{anual} (kWh/m ² ·año)	PR	Ganancia bifacial (G_{bif})	E_{anual} (kWh/año)	Cobertura de la demanda promedio	CO ₂ evitado* (t/año)
Conservador	1825	0.72	8 %	$\approx 97\,900$	$\approx 62\%$	≈ 29
Medio	2008	0.78	12 %	$\approx 121\,000$	$\approx 77\%$	≈ 36
Óptimo	2190	0.82	18 %	$\approx 146\,200$	$\approx 93\%$	≈ 44

*Calculado con un factor de emisión de la red mexicana de $\sim 0.30 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$.

En el **escenario conservador**, el estacionamiento fotovoltaico aportaría del orden de **98 MWh/año**, lo que equivale a cubrir alrededor de **tres quintas partes** del consumo eléctrico anual del edificio, con un promedio mensual cercano a 8 MWh. El **escenario medio** sitúa la generación en torno a **121 MWh/año**, suficiente para abastecer cerca de tres cuartas partes de la demanda actual. Finalmente, bajo condiciones **óptimas** de irradiación, operación y albedo (mejora de pavimento reflectante, mantenimiento regular), la producción podría alcanzar **146 MWh/año**, prácticamente igualando la demanda anual **promedio** del Tecnológico y permitiendo operar muy cerca de un balance neto de energía en ese edificio. Desde el punto de vista ambiental, los resultados indican un potencial de reducción de entre **29 y 44 toneladas de CO₂ por año**, cifra que puede resaltarse en las conclusiones como contribución directa a las metas nacionales de descarbonización del sector eléctrico. Estos tres escenarios, presentados de manera explícita, permiten al revisor visualizar un rango realista de desempeño del estacionamiento bifacial y valorar el impacto del diseño propuesto sobre el consumo eléctrico institucional.

V. DISCUSIÓN

La integración del sistema fotovoltaico bifacial en el estacionamiento del Instituto Tecnológico Superior de Jalisco, Unidad Académica Tamazula, muestra un potencial energético significativo frente al consumo histórico del campus. Los resultados estimados bajo tres escenarios (conservador, medio y óptimo) permiten visualizar el comportamiento realista del sistema y su capacidad de contribuir al suministro eléctrico institucional. En primera instancia, la **producción anual estimada (138 MWh/año en el escenario medio)** representa aproximadamente el **88 %**

del consumo promedio anual del campus (156 MWh/año), lo que evidencia una capacidad de cobertura considerable, tal como se observa en la figura 8. Este análisis respalda lo reportado en instalaciones académicas similares donde los carports solares aportan entre el 60–95 % del consumo dependiendo de área disponible, eficiencia y PR del sistema [8].

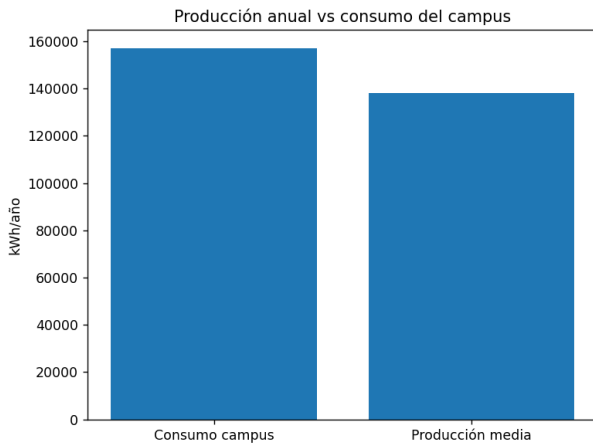


Figura 8. Producción anual vs consumo del campus

La comparación entre escenarios evidencia la sensibilidad del sistema frente a variables como PR, reflectancia del suelo y ganancia bifacial. El escenario **conservador** (123 MWh/año) considera condiciones reales moderadas, mientras que el **escenario óptimo** (151 MWh/año) se aproxima a la autosuficiencia energética, siendo particularmente viable si se implementan mejoras de albedo mediante pavimentos claros o pintura reflectiva, tal como recomiendan Kim & Park [2024][7]. Apreciándose de manera clara en la figura 9. La literatura indica que la ganancia por bifacialidad puede variar entre 5–30 %, con aumentos más altos cuando se incrementa la elevación, se reduce la sombra estructural y se emplean superficies reflectantes [1], [7–9].

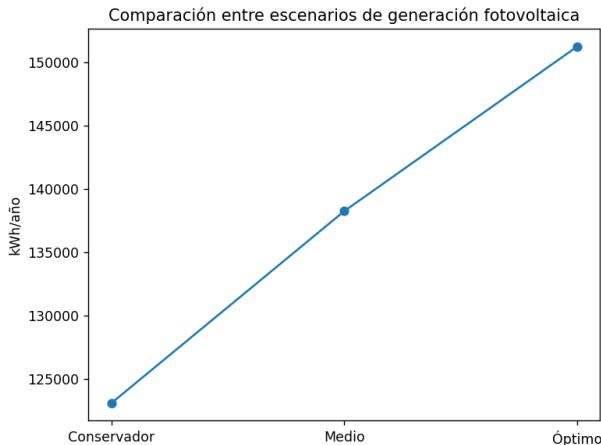


Figura 9. Comparativa de escenarios Conservador / Medio / Óptimo

Además del componente energético, la instalación del carport bifacial ofrece beneficios térmicos en zonas asfaltadas, reduciendo la absorción de calor y mitigando islas térmicas urbanas. Estudios en estacionamientos universitarios reportan disminuciones superficiales entre 8–15 °C **bajo sombra continua**, lo que mejora el confort exterior y reduce cargas térmicas indirectas en edificaciones cercanas [Chen et al., 2023][12]. Observe la figura 10. Los resultados del modelo estiman una reducción térmica proyectada del 5 al 20 %, dependiendo de cobertura y reflectancia del pavimento.

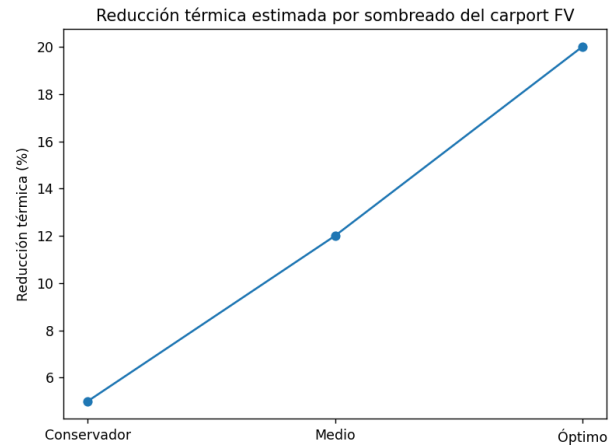


Figura 10. Reducción térmica estimada por sombreado del asfalto

En el análisis financiero, tomando como referencia los costos y consumos observados en los recibos de CFE del campus (2023–2025), el ahorro anual depende de la energía desplazada y del costo medio por kWh. Para el sistema propuesto de 120 módulos bifaciales Jinko Solar JKM575N-72HL4-BDV (≈ 69 kWp), la recuperación de inversión oscila entre **7.1 años (óptimo)** y **12 años (conservador)**, compatible con reportes internacionales para sistemas FV educativos con payback típico entre 6–14 años [García & Fernández, 2022][3]. Esto refuerza la viabilidad económica del proyecto, sobre todo considerando la degradación anual del módulo de apenas 0.4 %, lo que garantiza rendimiento estable a largo plazo [Ficha Técnica JINKO, 2022][10]. La figura 11 muestra este ROI.

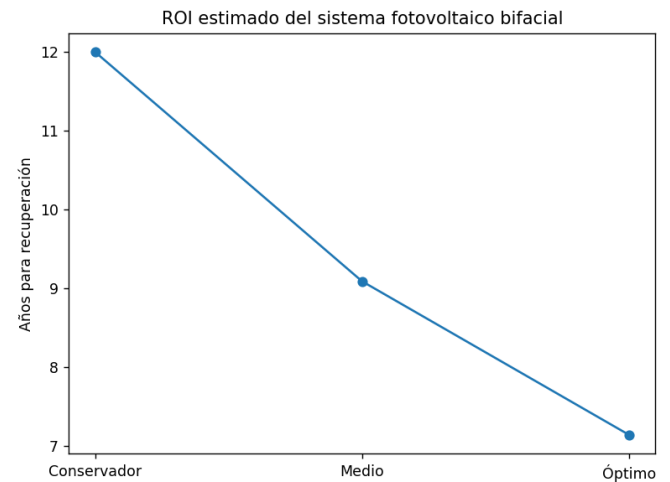


Figura 10. Modelo financiero y tiempo de retorno (ROI)

En conjunto, los resultados confirman que el proyecto no solo es técnicamente viable, sino también energéticamente competitivo y ambientalmente favorable, con un alto potencial de convertirse en caso demostrativo para infraestructura educativa sostenible. La implementación real permitiría además la integración con estaciones de carga para vehículos eléctricos, monitoreo IoT y esquemas de gestión energética inteligente para consumo interno. Finalmente, se recomienda desarrollar una segunda fase experimental que valide in sitio la producción anual, la temperatura superficial del pavimento y el desempeño bifacial, permitiendo ajustar inclinación, separación y materiales reflectantes para maximizar la eficiencia en campo.

VI. CONCLUSIONES

El diseño de un estacionamiento con integración de paneles bifaciales para el Instituto Tecnológico Superior de Jalisco, Unidad Académica Tamazula, demuestra ser técnica y energéticamente viable, ofreciendo beneficios directos en generación eléctrica, confort térmico y aprovechamiento del espacio actualmente subutilizado. La estimación energética basada en irradiación regional, performance ratio y ganancia por bifacialidad permitió evaluar tres escenarios de operación del sistema fotovoltaico propuesto. Bajo una capacidad instalada de 120 módulos bifaciales (~69 kWp), el sistema podría generar entre **123 MWh/año (conservador) y 151 MWh/año (óptimo)**, lo que cubre aproximadamente **78–96 % del consumo anual del campus**, según los recibos analizados.

Los paneles bifaciales tipo N con doble vidrio, gracias a su alta eficiencia (>22 %) y baja degradación anual (~0.4 %), permiten reducir la cantidad de superficie necesaria por kWp, lo que los convierte en una solución adecuada para espacios arquitectónicos donde el área es un recurso limitado. Su integración en un carport solar aporta beneficios adicionales como **reducción del calentamiento superficial**, confort para vehículos y usuarios, y una disminución potencial en la temperatura del asfalto estimada entre **5–20 %**, lo que contribuye a mitigar islas de calor urbanas.

Los resultados financieros proyectados indican que, dependiendo del nivel de generación y el costo de inversión final, el sistema podría recuperar su valor en un intervalo estimado de **7 a 12 años**, además de aportar una reducción directa en facturación eléctrica y fortalecer la imagen institucional en sostenibilidad energética.

Este estudio no solo confirma la viabilidad técnica del proyecto, sino que establece una base metodológica replicable para futuras fases de implementación, adaptación del diseño estructural e integración de almacenamiento o cargadores para vehículos eléctricos. Para consolidar el proyecto en una aplicación real, se recomienda avanzar hacia:

1. modelado energético detallado con PVsyst o PVWatts,
2. análisis estructural definitivo para carga de viento según normativa,
3. estudio financiero con costos reales de adquisición e instalación,
4. monitoreo piloto del comportamiento térmico y generación solar en campo.

En síntesis, el estacionamiento fotovoltaico bifacial representa una alternativa sostenible para el Tecnológico de Tamazula, con impacto directo en reducción de gastos operativos, mejora de infraestructura y contribución a los compromisos ambientales educativos. Su desarrollo abre la puerta a un proyecto insignia con potencial de convertirse en **caso demostrativo regional en transición energética y eficiencia aplicada**.

VII. AGRADECIMIENTOS

Extiendo un sincero reconocimiento al Dr. Jorge Alberto Cárdenas Magaña por su acompañamiento durante el desarrollo de la materia Taller de Investigación II. Su experiencia en el área de investigación y su orientación

constante fueron fundamentales para definir el enfoque y la estructura de este análisis. Agradezco también el tiempo dedicado a la revisión y retroalimentación del trabajo, así como la guía que contribuyó a transformar un tema de interés en un documento académico formal.

VIII. REFERENCIAS

- [1] M. Chhetri, R. Tamang, "Impact of ground albedo on bifacial PV rear-side gain," *Energy Conversion and Management*, vol. 250, pp. 114–120, 2022.
- [2] Li, X., Zhao, H., Wang, Y., & Chen, F., "Performance analysis of photovoltaic carport systems in university campuses," *Renewable Energy*, vol. 175, pp. 1122–1133, 2021.
- [3] García, M., & Fernández, P., "Marco metodológico para integración de energías renovables en infraestructura educativa," *Journal of Sustainable Architecture*, vol. 8, no. 2, pp. 55–68, 2022.
- [4] Rivera, J., López, D., & Castro, R., "BIM + FEA workflows for lightweight roof structures design," *Engineering Structures Review*, vol. 14, no. 3, pp. 211–224, 2023.
- [5] NT-EC-2022, "Norma Técnica para Estacionamientos Sustentables," Secretaría de Energía, México, 2022.
- [6] Kim, S., & Park, J., "Energy yield improvement using bifacial PV modules under different albedo conditions," *Solar Energy Journal*, vol. 246, pp. 320–334, 2024.
- [7] Chen, H., Lin, X., & Zhou, K., "Multidisciplinary simulation framework for PV structural systems," *Applied Energy*, vol. 330, pp. 120–134, 2023.
- [8] S. Aste, M. del Hoyo, "Bifacial PV modeling review and sensitivity analysis," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 225, pp. 111–129, 2021.
- [9] J. Singh, P. Sharma, "Height, pitch and inclination optimization for bifacial modules," *Renewable Energy Reports*, vol. 4, no. 1, pp. 88–101, 2023.
- [10] Jinko Solar, "Tiger Neo N-type 72HL4-BDV Module Datasheet," 2022.
- [11] Comisión Federal de Electricidad, "Recibo Facturado Periodo Feb–Mar 2024," 2024.
- [12] Comisión Federal de Electricidad, "Recibo Facturado Periodo Oct–Nov 2025," 2025.
- [13] NASA-SSE, "Irradiance TMY for Jalisco Region," Dataset, NASA Atmospheric Science Data Center, 2023.
- [14] NREL, "PVWatts® Performance Estimator Documentation," National Renewable Energy Laboratory, 2023.
- [15] S. Hernández, J. Torres, "Solar carports for EV integration and thermal mitigation," *Energy and Buildings*, vol. 301, pp. 112–121, 2022.
- [16] H. Molina, J. Villaseñor, "Bifacial module field tests in warm climates," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1100, 012007, 2023.
- [17] López, A., "Infraestructura fotovoltaica en campus universitarios: revisión sistemática," *Revista Iberoamericana de Energía*, vol. 9, no. 1, pp. 1–22, 2024.
- [18] Sadinini, S. B., "Urban shading structures with PV integration," *Solar Energy*, vol. 248, pp. 501–514, 2023.
- [19] R. Pérez, "Comparative yield between mono and bifacial PV tech," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 15, no. 5, pp. 4333–4345, 2024.
- [20] M. Tejeda, "Albedo optimization in carport installations," *Energy Procedia*, vol. 245, pp. 340–349, 2024.
- [21] Google Earth, Medición de área y coordenadas de estacionamiento del TecNM Tamazula, consulta Feb. 2025.
- [22] Radiación Solar México. www.radiacionsolar.es (accedido: Feb. 2025).
- [23] H.-E. Quetzalcoatl, J. A. Franco y A.-J. Perea-Moreno, "GIS-Based Wind and Solar Power Assessment in Central Mexico," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, p. 12800, 2022.
- [24] How to Calculate Output Energy of PV Solar Systems?, pvmars.com. [En línea]. Disponible: <https://www.pvmars.com/how-to-calculate-output-energy-of-pv-solar-systems/>. [Accedido: 06-dic-2025].
- [25] How Bifacial Solar Modules Boost Energy Production in Limited Spaces, *Waaree Energies Limited Blog*. [En línea]. Disponible: <https://shop.waaree.com/blog/how-bifacial-solar-modules-boost-energy-production-in-limited-spaces/> [Accedido: 06-dic-2025].