

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO (SFV) PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS EXTERIORES DE LA BIBLIOTECA CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

EVALUATION OF A SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM (SFV) TO SUPPLY ELECTRICAL ENERGY TO THE EXTERIOR OF THE CENTRAL LIBRARY OF THE PRIVATE UNIVERSITY OF TACNA

Williams S. Almanza-Quispe¹, Fernanda I. Zapata-Bobadilla², José A. Aguilar-Cuchillo¹, Leonardo W. Aycachi Huaricallo¹

¹Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

²Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

Recibido (Received): 16 / 07 / 2024 Publicado (Published): 16/ 07 / 2025

RESUMEN

La generación de energía eléctrica a base de la quema de gas natural es la segunda fuente con mayor predominancia en el país, emitiendo más de 16 millones de kg de CO₂ al año. Lograr la transición a fuentes de energía renovables es parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para combatir el cambio climático y el uso de energía solar es una alternativa con gran potencial en el Perú. Es por ello que la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica de un Sistema Solar Fotovoltaico (SFV) para suministrar energía eléctrica en los exteriores de la Biblioteca Central de la Universidad Privada de Tacna. El trabajo consistió en estimar la demanda energética que abastecerá el SFV para diseñar y dimensionar los componentes del mismo, además de evaluar su funcionamiento en las condiciones climáticas del área de estudio. El SFV tuvo una generación diaria promedio de 1536.67 ± 359.48 Wh/día entre los meses de evaluación, cubriendo satisfactoriamente las necesidades de la población estudiantil. Además, se proyectó una reducción anual de las emisiones de GEI del 0.13 % con respecto a las emisiones totales del campus universitario, equivalentes a 148.26 kgCO₂eq/kWh, presentándolo como una alternativa innovadora para su réplica en otras zonas del campus universitario, además de ser un atractivo modelo a escalarse por los gobiernos locales en los diferentes espacios públicos de sus jurisdicciones.

Palabras Clave: Energía renovable, energía solar, sistema solar fotovoltaico, demanda energética, energía eléctrica.

ABSTRACT

The generation of electricity based on the burning of natural gas is the second most predominant source in the country, emitting more than 16 million kg of CO₂ per year. Achieving the transition to renewable energy sources is part of the Sustainable Development Goals to combat climate change and the use of solar energy is an alternative with great potential in Peru. For this reason, the objective of this research was to evaluate a Solar Photovoltaic System (SFV) to supply electricity to the exterior of the Central Library of the Universidad Privada de Tacna. The work consisted of estimating the energy demand to be supplied by the PVS in order to design and dimension its components, as well as to evaluate its performance under the climatic conditions of the study area. The SFV had an average daily generation of 1536.67 ± 359.48 Wh/day between the months of evaluation, satisfactorily covering the needs of the student population. In addition, an annual reduction of GHG emissions of 0.13 % with respect to the total emissions of the university campus was projected, equivalent to 148.26 kgCO₂eq/kWh, presenting it as an innovative alternative for replication in other areas of the university campus, in addition to being an attractive model to be scaled by local governments in the different public spaces of their jurisdictions.

Keywords: Renewable energy, solar energy, solar photovoltaic system, energy demand, electrical energy.

¹ Corresponding author.:
E-mail: walmanza@unjbgu.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

La Universidad Privada de Tacna (UPT) es un centro educativo de gran importancia en la región sur del Perú, con una población estudiantil activa que depende constantemente de recursos eléctricos para sus actividades académicas. En particular, los espacios comunes y de esparcimiento, son frecuentemente utilizados por los estudiantes para cargar dispositivos móviles y computadoras portátiles, así como para acceder a sistemas de iluminación durante sus estudios. No obstante, en algunas zonas existen deficiencias con este servicio que no cubren las necesidades de los estudiantes, como la baja iluminación en los exteriores de la Biblioteca Central, requiriendo mejorar las instalaciones y destinar recursos económicos para su mantenimiento.

La UPT, al igual que muchas otras instituciones educativas en el país, enfrenta la necesidad urgente de diversificar su matriz energética y reducir la dependencia de fuentes convencionales de electricidad. Dado que la producción de electricidad es una actividad ampliamente contaminante. Cerca del 67% de sus fuentes provienen de la quema de combustibles fósiles [1], los cuales liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) al ambiente [2].

Para afrontar este desafío, es necesario tomar acción y encontrar otras fuentes para generar energía eléctrica. Aquí es donde aparecen las energías renovables como una alternativa limpia y amigable para el ambiente por tener una reducida huella de carbono [3]. La energía solar es una de las fuentes más prometedoras por ser gratuita, inagotable y disponible en todo el mundo, además, que no produce emisiones contaminantes en su operación [4].

A pesar del gran potencial de uso de la energía solar en Tacna como fuente renovable, la adopción de tecnologías fotovoltaicas en universidades y otras instituciones educativas sigue siendo limitada. En este contexto, realizar una prueba piloto de un Sistema Solar Fotovoltaico (SFV) en las zonas con deficiencia energética de la UPT se vio como una solución innovadora, estratégica y ecológica, donde la experiencia adquirida podría replicarse en otros espacios educativos y urbanos, contribuyendo al cambio hacia una matriz energética más limpia en el Perú.

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica de un SFV para suministrar energía eléctrica a las instalaciones exteriores de la Biblioteca Central de la Universidad Privada de Tacna que

permita satisfacer las necesidades energéticas de la población estudiantil bajo una solución ambientalmente amigable.

2. ANTECEDENTES

A nivel mundial, se ha evidenciado que las acciones para combatir el cambio climático y fomentar el desarrollo sostenible se complementan entre sí. Para lograr un desarrollo sostenible es indispensable adoptar medidas contra el cambio climático. En virtud de ello, en el año 2015, se aprobaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de la Agenda 2030 de la ONU [5]. Con un total de 17 objetivos, se busca tomar acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar el bienestar de todas las personas en el mundo.

El uso de la energía solar para generar electricidad a través de SFV juega un papel importante en el logro de 4 de estos objetivos [6]. Con los SFV se puede garantizar una fuente de energía asequible, confiable y no contaminante (ODS Nro. 7) tomando acción por el clima puesto que reduce significativamente las emisiones de GEI (ODS Nro. 13). Además, por medio de la innovación y desarrollo de tecnologías limpias (ODS Nro. 9) propicia que muchas ciudades y comunidades transiten a alternativas más sostenibles (ODS Nro. 11). Por desgracia, a pesar de los beneficios que conlleva, la aplicación de esta energía aún es limitada.

En el Perú, la producción de energía eléctrica nacional se sustenta en la hidroeléctrica con una participación aproximada del 63% [7], sin embargo, la disponibilidad de este recurso es estacional y es afectada por eventos climatológicos como el retraso de temporada de lluvias. Ante esa eventualidad, la demanda energética es cubierta por el segundo recurso dominante, la generación en base a gas natural [8]. Esto llevó a que para el 2021 se generara un total de 16 063 millones de kg de CO₂ emitidas al ambiente por la transformación de energía primaria a secundaria y consumo propio. De acuerdo al Balance Nacional de Energía elaborado por el Ministerio de Energía y Minas [9], desde el 2006 hasta el 2021 se ha presentado un crecimiento sostenido de estas emisiones debido al uso de gas natural para la generación de electricidad.

Esto ha llevado a considerar una mayor diversificación la matriz energética del país, priorizando las fuentes de energías renovables. Es así que, en el 2008, el Perú declara de interés nacional el desarrollo de la generación eléctrica mediante el uso de Recursos Energéticos Renovables (RER) por

medio de la promulgación del Decreto Legislativo 1002 [10]. La norma contempló los recursos de biomasa, eólico, solar, geotérmico y mareomotriz, y por medio de subastas se logró la participación de diversos proyectos que están cubriendo la energía ofertada y vienen trabajando hasta la actualidad.

El potencial de desarrollo de la energía solar como fuente de electricidad en el Perú es excepcional. Por encontrarse cerca de la línea ecuatorial, cuenta con una excelente disponibilidad de energía, con mayor número de horas de sol y uniforme durante todo el año a diferencia de otros países. De acuerdo al Atlas de Energía Solar del Perú [11], la zona de mayor disponibilidad de energía solar se encuentra en la costa sur con un promedio de 6 a 6.5 kWh/m². Seguido de la costa norte y gran parte de la sierra sobre los 2 500 msnm, con una energía disponible promedio entre 5,5 a 6 kWh/m². En base a ello, el Perú cuenta con 7 plantas solares fotovoltaicas ubicadas en Arequipa, Moquegua y Tacna, las cuales que fueron adjudicadas mediante subastas RER. La central solar Rubí, la más grande del país, alberga 560 000 paneles solares fotovoltaicos y se calcula una producción de 415 GWh por año. La energía inyectada a la red nacional cubre las necesidades de alrededor 350 000 hogares. Sin embargo, el aporte de esta energía aún es reducido frente a otras fuentes, estando lejos todavía de alcanzar una transición energética sostenible [12].

En relación al estudio y aplicación de la energía solar en Tacna, existe una serie de antecedentes documentados con resultados positivos. En el trabajo elaborado por Polo et al. [13], se evaluó un sistema solar fotovoltaico interconectado a la red durante el periodo de enero del 2015 a diciembre del 2019. El sistema fue instalado en el techo del Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT) de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG) compuesto por 12 paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino, cubriendo una superficie total de 19.8 m². La energía generada promedio fue de 427 KWh/mes, alcanzando su máxima producción entre los meses de octubre a marzo. Además de los beneficios ambientales, representó un ahorro económico significativo para la UNJBG.

En un caso similar, en la reciente construcción de la infraestructura de la Escuela Profesional de Artes de la UNJBG, se dispuso la instalación de paneles solares en la azotea para el abastecimiento de energía eléctrica del edificio de 4 niveles y más de 50 ambientes. El sistema también fue interconectado a la red pública para trabajar de manera conjunta y pueda abastecer por las noches o los días de poca irradiación solar. Se ha evidenciado que brinda un óptimo servicio de electricidad convirtiéndose en el

primer pabellón de la universidad en aplicarlo, además de proporcionar información piloto para replicar el sistema en otros pabellones de la casa de estudios [14].

Por lo expuesto previamente, se ha demostrado que Tacna es una de las regiones con mayor potencial de energía solar en el país. Es por ello que, mediante la ejecución del presente proyecto se busca recabar información experimental acerca de la demanda energética de los espacios ubicados en los alrededores de la biblioteca central de la UPT y poder convertirlos en espacios útiles y un modelo a seguir para la aplicación de tecnologías limpias, eficientes y renovables, que a su vez contribuyan a la lucha contra el cambio climático y reducción de la contaminación en la región.

3. METODOLOGÍA

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló dentro de las instalaciones de la Universidad Privada de Tacna (UPT), en los alrededores de la Biblioteca Central.

Esta área de esparcimiento y descanso para los estudiantes universitarios fuera de horarios de clase, es frecuentado constantemente como punto de reunión para sesiones de estudio y para aquellos que buscan acceder a los servicios de la Biblioteca Central; sin embargo, se observó que luego del atardecer existen deficiencias en el sistema de iluminación por un reducido número de focos que no cubren la totalidad del área en extensión e intensidad, reduciendo la visibilidad del entorno y la concurrencia de los estudiantes.

Es así que, como parte del mejoramiento del sistema de iluminación, se propuso implementar la instalación de un SFV piloto para probar su viabilidad técnica ya que el área demostró contar con gran disponibilidad de luz solar durante el día que podría garantizar el funcionamiento permanente de las instalaciones eléctricas.

Se ocuparon las pérgolas dispuestas en estos espacios libres para realizar la instalación del SFV.

TABLA I
Coordenadas de ubicación del SFV

Área de estudio	Zona	Coordenadas UTM	
		Latitud	Longitud
Exterior de la Biblioteca Central de la UPT	19 S	-18.0066	-70.2272



Fig. 1. Vista satelital del área de estudio

3.2. PROCEDIMIENTO

La metodología empleada se estructuró en las siguientes en tres etapas:

a) Estimación de la demanda energética

A través de fichas de observación se recopiló información sobre la afluencia de estudiantes que visitan el área de estudio y los dispositivos eléctricos que utilizan durante su permanencia.

Con la información obtenida, se identificaron las necesidades eléctricas de la población estudiantil que ocupa los espacios libres a los exteriores de la Biblioteca Central, y de esa forma poder estimar la demanda energética que deberá suministrar el SFV para satisfacer el requerimiento de energía considerando la potencia de los equipos eléctricos y una estimación de las horas de uso durante un día.

b) Diseño e instalación del sistema solar fotovoltaico

Con los resultados de la demanda energética y considerando las condiciones climatológicas de la localidad, se realizaron los cálculos correspondientes para el diseño del SFV que comprendió los siguientes componentes principales: paneles fotovoltaicos, regulador, inversor y baterías. Se tomaron como referencia los cálculos empleados por Mejía [15], que consistieron en las siguientes fórmulas:

– Determinación de la energía de instalación

El SFV no solo debe generar energía suficiente para cubrir la demanda de la población que beneficiará, sino que debe compensar la energía que pierde al pasar por los diferentes componentes del

sistema. La energía de instalación (E_{ins}) se calcula con la energía demandada (E_{dm}) y el coeficiente global de eficiencia (n_T).

$$E_{ins} = \frac{E_{dm}}{n_T} \quad (1)$$

Para obtener el coeficiente global de eficiencia (n_T) se requiere considerar los coeficientes de pérdidas por rendimiento de los componentes:

$$n_T = [1 - (K_B + K_C + K_R + K_X)] \quad (2)$$

Donde:

K_B : Pérdidas por rendimiento de las baterías.

K_C : Pérdidas por rendimiento del inversor.

K_R : Pérdidas por rendimiento del regulador.

K_X : Otras pérdidas no consideradas.

– Determinación de la inclinación de los paneles

Para el cálculo de la inclinación óptima, se requiere la latitud de la ubicación del SFV:

$$\beta_{\text{óptima}} = 3.7^\circ + 0.69|Latitud| \quad (3)$$

– Cálculo del número de módulos fotovoltaicos

Para obtener el número total de paneles fotovoltaicos (N_{TP}) es indispensable tener en cuenta las características del panel solar que se empleará para el cálculo de la energía que producirá cada uno (E_{panel}), así como las horas solares pico (HSP).

$$E_{panel} = W_p \cdot HSP \cdot \left(\frac{V_{np}}{V_p} \right) \quad (4)$$

$$N_{TP} = \frac{E_{ins}}{E_{panel}} \quad (5)$$

Donde:

W_p : Potencia pico del panel.

V_{np} : Tensión nominal del panel.

V_p : Tensión pico.

Por otro lado, para la configuración del sistema es necesario calcular el número de paneles en serie (N_{ps}) y en paralelo (N_{pp}). El número de paneles calculado debe redondearse por el exceso a número entero para su aplicación y cubrir los requerimientos.

$$N_{PS} = \frac{V_{nom}}{V_{np}} \quad (6)$$

$$N_{PP} = \frac{N_{TP}}{N_{PS}} \quad (7)$$

Donde:

V_{nom} : Tensión nominal del sistema fotovoltaico.

– Dimensionamiento del regulador

La capacidad del regulador de carga debe ser superior a la corriente máxima de corto circuito de los paneles (I_{sc}), tomando en cuenta un factor de seguridad por ampacidad y temperatura (1.25) y el número de paneles en paralelo (N_{PP}).

$$I_{regulador} = 1.25 \cdot N_{PP} \cdot I_{sc} \quad (8)$$

– Dimensionamiento del inversor

La potencia nominal del inversor debe ser superior a la potencia máxima de las cargas en corriente alterna (P_{CA}) considerando un factor de simultaneidad (F_s). Es decir, para el dimensionamiento del inversor se considera un escenario donde deberá asumir la carga de los diferentes dispositivos móviles en simultáneo.

$$P_{inversor} = P_{CA} \cdot F_s \quad (9)$$

– Dimensionamiento del banco de baterías

El banco de baterías permitirá la autonomía del sistema en días con baja irradiación (días nublados o lluviosos) y durante las noches. Para determinar la capacidad nominal del banco de baterías (C_{banco}) se debe tomar en cuenta los Ah de la demanda de energía (L_D) y los días de autonomía (D_{aut}) que se establecerá al sistema.

$$L_D = \frac{E_{dm}}{V_{bat}} \quad (10)$$

$$C_{banco} = \frac{L_D \cdot D_{aut}}{FP_{Dmax} \cdot F_{CT}} \quad (11)$$

Donde:

V_{bat} : Tensión nominal de la batería.

FP_{Dmax} : Factor de profundidad de descarga máxima.

F_{CT} : Factor de corrección por temperatura.

Con ello, se puede calcular el número total de baterías del banco (N_{TB}) y su configuración en serie (N_{BS}) y en paralelo (N_{BP}).

$$N_{TB} = \frac{V_{nom} \cdot C_{banco}}{V_{bat} \cdot C_{bat}} \quad (12)$$

$$N_{BS} = \frac{V_{nom}}{V_{bat}} \quad (13)$$

$$N_{BP} = \frac{N_{TB}}{N_{BS}} \quad (14)$$

Con los cálculos y dimensionamientos obtenidos, se diseñó el SFV considerando también los elementos auxiliares (cables, iluminaria, tomacorrientes, entre otros) que contribuirán al adecuado funcionamiento del sistema conforme a la NTP 399.403 2006: Sistemas Fotovoltaicos hasta 500 Wp [16].

Posteriormente, la instalación se realizó en el techo de las pérgolas ubicadas al exterior de la Biblioteca Central de la UPT tomando en cuenta las disposiciones previstas en la Norma Técnica de Edificación EM.080, Instalaciones con Energía Solar [17].

c) Evaluación del funcionamiento del SFV instalado

Finalmente se evaluó el funcionamiento del SFV en operación registrando la potencia de energía generada por día, así como las Horas Solares Pico (HSP). La información registrada en el inversor fue gestionada por medio del software Solar Power Monitor para posteriormente realizar un procesamiento estadístico descriptivo y determinar el rendimiento del sistema.

Además, para estimar el impacto ambiental asociado al consumo de electricidad, se cuantificó la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) que se evitó generar por utilizar energías renovables en lugar de electricidad procedente del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Para este cálculo, se empleó la metodología del Protocolo de GEI [18] y los resultados se expresan en una unidad común denominada dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}).

$$E_{GEI} = [C_{SEIN} \cdot (1 - P_{TD}) \cdot F_{GEI}] + [C_{SEIN} \cdot P_{TD} \cdot F_{GEI}] \quad (15)$$

Donde:

E_{GEI} : Emisiones de GEI por el consumo de electricidad.

C_{SEIN} : Consumo de electricidad por año.

P_{TD} : Pérdidas por transmisión y distribución.

F_{GEI} : Factor de emisión.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DEMANDA ENERGÉTICA ESTIMADA

En base a la información obtenida del proceso de observación, se identificó que el principal consumo de la población estudiantil de la UPT responde a la carga de dispositivos móviles y computadoras portátiles, además del alumbrado público durante la noche. Es por ello que, como parte del proyecto, se habilitó un sistema de iluminación compuesto por 12 focos LED de 10 W, y la instalación de 6 tomacorrientes (con 2 puertos de tipo USB y 1 de tipo B estándar) para conectar los cargadores para celulares y laptops tomando en cuenta un consumo máximo de 30 y 80 W, respectivamente.

TABLA II
Estimación de la demanda energética del SFV

N°	Descripción de cargas eléctricas	Cantidad	Potencia (W)	Potencia total (W)	Tiempo de operación diaria (horas)	Consumo diario (Wh/día)
Iluminación						
1.1	Foco LED	12	10	120	04	480
Equipos						
2.1	Carga para computadora portátil	02	80	160	02	320
2.2	Carga para dispositivo móvil	03	30	90	02	180
Totales				370		980

Para la estimación de la demanda energética se consideró que al menos una $\frac{1}{4}$ parte de los tomacorrientes se encuentren conectados por 2 horas al día y el sistema de iluminación funcione por 4 horas. Dichos supuestos se alinean con la cantidad de dispositivos que típicamente usarían la energía eléctrica en estos espacios (2 laptops y 3 celulares) y el horario de encendido del alumbrado público hasta el término del horario académico de la universidad.

Con lo anterior, se estimó la demanda eléctrica del SFV tal como se muestra en la Tabla II, obteniendo una potencia de 980 Wh/día

4.1. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO INSTALADO

Tomando en cuenta las características del área de estudio, se eligió utilizar paneles fotovoltaicos de la marca Eco Green Energy (Modelo Solar Policristalino EGE-150-175 P-36) con certificaciones IEC 61215, IEC 61730 y CE ISO 9001:2015. En la Tabla II se muestran las principales características del mencionado panel solar.

La degradación típica de los paneles solares se encuentra entre 0.5 % a 1 % por año dependiendo del modelo y la marca del mismo. Si consideramos el factor climático de la zona de funcionamiento, para zonas de clima tropical desértico, próximo al de Tacna, se reporta una media de degradación anual de 0.93 % [19]. A partir de lo anterior, es esperado que los paneles solares empleados tengan una degradación del 9.3 % y 18.6 % a los 10 y 20 años de uso, respectivamente.

Para el coeficiente global de eficiencia se consideraron valores estándar del rendimiento de cada componente provistos en las características de fabricación, reflejando las pérdidas de energía en los paneles solares (debido a la conversión de energía), el inversor (en la conversión de CC a CA), el regulador de carga (ajuste de energía a las baterías) y otras

pérdidas no especificadas como pérdidas en cables, obteniéndose un valor de 0.65 como coeficiente global de eficiencia. Es importante mencionar que para el diseño del SFV solo se tomó en cuenta la eficiencia de cada elemento que lo compone, mas no factores de envejecimiento ni degradación del sistema. Ya que los primeros son determinantes en la generación real de energía eléctrica del sistema; mientras que, los factores de envejecimiento y degradación son pasibles de reducir su impacto con buenas prácticas de conservación y mantenimiento del sistema. Eso permitirá que el SFV mantenga su eficiencia dentro de la vida útil estimada por el fabricante de cada componente, y no se vea reducida hasta menos de 6 años como en otras investigaciones [20].

Con la demanda eléctrica que debe cubrir el SFV y el coeficiente global de eficiencia del sistema se determinó que la energía de instalación debía ser 1507.7 Wh. A partir de ello se diseñó y dimensionó los componentes del SFV conforme a la metodología establecida, cuyos resultados se resumen en la Tabla IV.

Para la selección de los equipos se recomienda hacer un sobredimensionamiento de los componentes para evitar problemas y deficiencias durante el funcionamiento y tenga capacidad de soportar picos de tensión. Aunque implique un mayor coste inicial, los beneficios en términos de reducción de costos operativos, mayor eficiencia a largo plazo y retorno de inversión más rápido lo hacen una estrategia rentable a largo plazo. Además, proporciona mayor seguridad energética, menor dependencia de la red eléctrica y, potencialmente, ingresos adicionales, lo que hace que el sobredimensionamiento sea una estrategia clave en proyectos de energía renovable.

Por lo cual, en la Tabla V se describen los equipos seleccionados para cubrir los requerimientos calculados.

TABLA III
Principales características eléctricas del panel solar

Característica	Valor	Unidad
Potencia nominal (W_p)	150	W
Tensión nominal (V_{np})	18.4	V
Corriente en máxima potencia (I_{mp})	8.15	A
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	22.51	V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	8.75	A
Eficiencia	15.13	%
Garantía de energía	10 - 12	años

Nota: Valores brindados por el proveedor

TABLA IV
Dimensionamiento del Sistema Solar Fotovoltaico

Parámetros de diseño	Valor	Unidad
Energía de instalación (E_{ins})	1507.7	Wh
Tensión del sistema (V_{nom})	24	V
Energía de cada panel (E_{panel})	478.4	W
Número total de paneles (N_{TP})	4	und
- En serie (N_{PS})	2	
- En paralelo (N_{PP})	2	
Capacidad del regulador ($I_{regulador}$)	19.3	A
Capacidad del inversor ($P_{inversor}$)	390.6	A
Capacidad del banco de baterías (C_{banco})	170.2	Ah
Número total de baterías (N_{TB})	4	und
- En serie (N_{BS})	2	
- En paralelo (N_{BP})	2	

TABLA V
Equipos empleados en el Sistema Solar Fotovoltaico

Elemento del SFV	Modelo	Características
Regulador de carga	PWM LCD Must solar	24 V y 20 A
Inversor	Victron Phoenix	24 V y 500 VA
Batería	Tensite Gel	100 Ah y 12 V

Con la información anterior se estableció el esquema de instalación del SFV para la ubicación de todos los componentes en el área de estudio, así como el sistema de iluminación y los tomacorrientes, como se detalla en la Fig. 2.

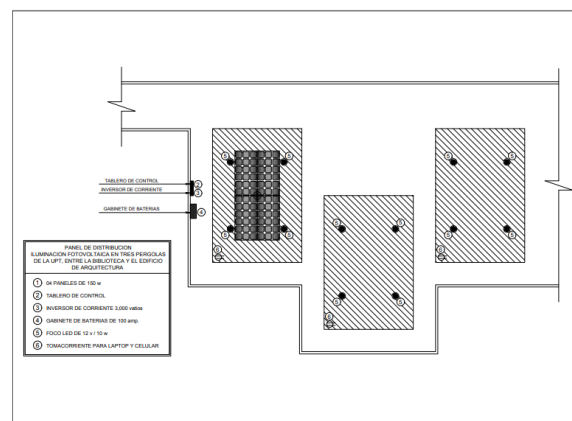


Fig. 2. Esquema de instalación del Sistema Solar Fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos se colocaron sobre una pérgola conectados dos en serie y dos en paralelo con una inclinación de 16.12° en dirección al norte. Para el sistema de iluminación se instalaron cuatro focos LED por cada grupo de pérgolas, acompañados de dos tomacorrientes. Todo el sistema fue puesto a prueba una vez instalado, respondiendo correctamente al funcionamiento (Fig. 3).

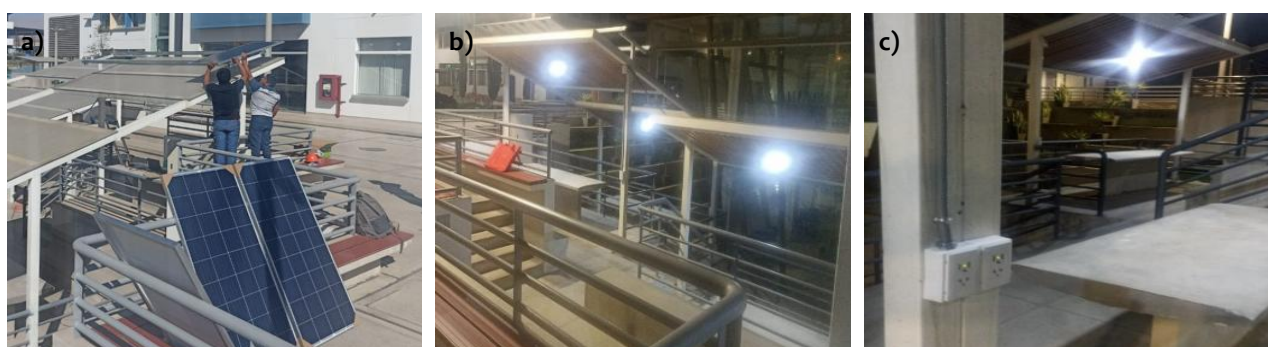


Fig 3. Instalación del Sistema Solar Fotovoltaico (a) y puesta en funcionamiento del sistema de iluminación (b) y tomacorrientes (c)

4.2. EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

En la Fig. 4 se presenta la generación diaria promedio de energía eléctrica producido por el SFV durante los meses de evaluación. Se obtuvieron resultados dentro del rango mínimo de 1100 Wh/día en el mes de julio hasta alcanzar un máximo de 1970 Wh/día en el mes de octubre, obteniendo que la

generación diaria promedio del SFV piloto fue de 1536.67 ± 359.48 Wh/día.

Durante los meses de julio y agosto, la generación diaria fue inferior a la energía proyectada para el sistema, no obstante, este fue fácilmente superado en los siguientes meses que hubo un aumento de las horas solar pico, tal como se muestra en la Tabla VI.

Esta variabilidad en los resultados obtenido se atribuye principalmente a las condiciones geográficas y climáticas de la zona. Parámetros como la velocidad y dirección del viento, precipitaciones, humedad relativa y temperatura ambiental afectan el adecuado funcionamiento de los paneles solares [21] [22]. Y factores como la estación del año, presencia de nubosidad o contaminación ambiental existente, disminuyen la duración y magnitud de las horas solares pico, reduciendo la irradiancia solar disponible para la generación de energía.

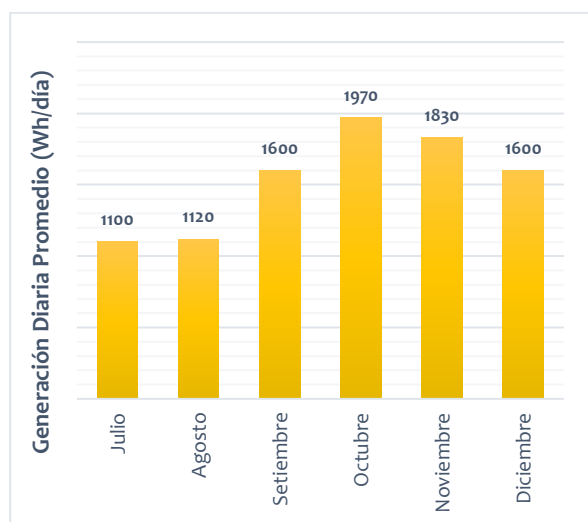


Fig. 4. Generación diaria promedio de energía eléctrica del SFV

TABLA VI
Evaluación del rendimiento del Sistema Solar Fotovoltaico

Mes	Generación diaria promedio (Wh/día)	HSP	Rendimiento (%)
Julio	1100	3.65	73
Agosto	1120	4.27	74
Setiembre	1600	5.05	106
Octubre	1970	5.8	131
Noviembre	1830	6.39	121
Diciembre	1600	6.77	106

Nota: Los valores de HSP se obtuvieron del proyecto POWER de la NASA [23]

En la Fig. 5 se observa la producción mensual del SFV durante los meses de evaluación variando de un mínimo de 33.6 kWh/mes en el mes de agosto hasta alcanzar un máximo de 59.1 kWh/mes en el mes de octubre. Dada las características del SFV instalado, es complejo comparar el rendimiento de producción energética con otras investigaciones por las diferencias de cada una en cuanto a la potencia y cantidad de paneles solares empleados, más aún para condiciones climáticas similares ya que el desarrollo de investigaciones en sistemas fotovoltaicos en Tacna es limitado. No obstante, con el estudio de Polo et al. [13] se muestra que la variabilidad de la producción mensual presenta una tendencia

semejante, dado que reportan un máximo de producción mensual entre los meses de octubre a marzo, que disminuye hasta los mínimos valores en los meses de abril a setiembre.

Debido a limitaciones de tiempo, no se consideró evaluar experimentalmente qué factores habrían provocado la variación en los resultados de generación de energía eléctrica por el SFV; sin embargo, en el estudio se decidió atribuir dicha variabilidad a los cambios en las condiciones climáticas por la transición de la estación de invierno a primavera/verano.

El SFV piloto fue capaz de suministrar la energía eléctrica requerida a todo el sistema de iluminación y los tomacorrientes instalados en el área de estudio, logrando satisfacer las necesidades de la población estudiantil a lo largo de cada mes. Esto demuestra su viabilidad técnica al cumplir con el objetivo de la instalación del SFV.

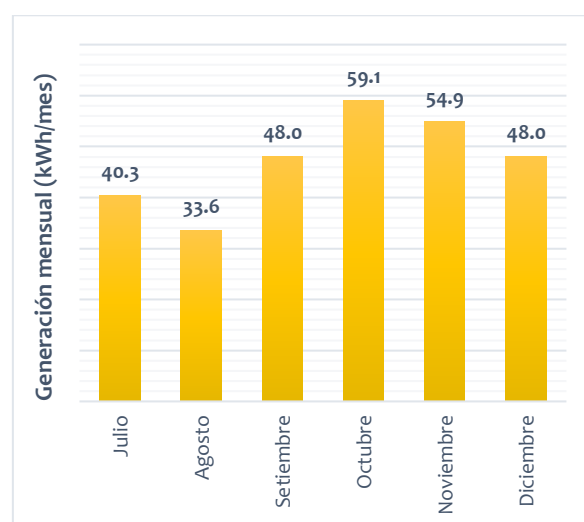


Fig. 5. Generación mensual de energía eléctrica del SFV

Para la cuantificación de emisiones de GEI, se empleó un factor de emisión de 0.2611 KgCO_{2eq}/kWh propuesto por la Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN-MINEM) [24], el porcentaje de pérdidas por transmisión y distribución de 11.1% a nivel nacional [25] y se estimó la cantidad de energía eléctrica generada por el SFV durante el periodo de un año. Reemplazando los valores en la ecuación (15), se obtuvo que al reemplazar la energía eléctrica proveniente del SEIN por la generada del SFV se deja de emitir 148.26 KgCO_{2eq}/kWh. Considerando que la producción de CO₂ por consumo de energía eléctrica anual del Campus Universitario donde se ubica el área de estudio es de 113.08 tCO₂ [26], este resultado representaría una reducción del 0.13 % de la huella de carbono de la UPT.

Las emisiones de GEI están directamente relacionadas con el consumo de energía convencional proveniente de la red eléctrica; mientras que, es inversamente proporcional con el uso de energías limpias. Es decir, a medida que aumente el uso de fuentes renovables para la producción de energía eléctrica, se contribuye a reducción de las emisiones de GEI [27]. Con el SFV piloto instalado en esta investigación podemos evidenciar que este cambio tiene un impacto positivo sobre el ambiente y abriría las puertas a aumentar los esfuerzos en la lucha contra el cambio climático con futuras replications en otros espacios del campus universitario.

CONCLUSIONES

- El SFV piloto estuvo compuesto por cuatro paneles solares fotovoltaicos de 150 W, un regulador de carga de 20 A, un inversor de 500 VA y cuatro baterías de 100 Ah, para cubrir una demanda energética de 980 Wh/día.
- La generación diaria promedio del SFV piloto fue de 1536.67 ± 359.48 Wh/día entre los meses de evaluación. El margen de incertidumbre responde a la variabilidad de las condiciones climáticas dando valores de generación de energía eléctrica dentro de un rango mínimo de 1100 Wh/día en el mes de julio hasta alcanzar un máximo de 1970 Wh/día en el mes de octubre.
- El SFV piloto fue capaz de suministrar la energía eléctrica requerida a todo el sistema de iluminación y los tomacorrientes instalados en los exteriores de la Biblioteca Central de la Universidad Privada de Tacna, logrando satisfacer las necesidades de la población estudiantil a lo largo de cada mes. Esto demuestra su viabilidad técnica al cumplir con el objetivo de la instalación del SFV.
- Por el uso de la energía eléctrica proveniente del SFV, se proyectó una reducción anual de las emisiones de GEI del 0.13 % con respecto a las emisiones totales del campus universitario, equivalentes a 148.26 kgCO_{2eq}/kWh.
- Los resultados del SFV en cuanto a su eficiencia e impacto ambiental, lo presentan como una alternativa innovadora para su réplica en otras zonas del campus universitario, además de ser un atractivo modelo a escalarse por los gobiernos locales en los diferentes espacios públicos de sus jurisdicciones.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar un análisis comparativo de los costos de implementación y mantenimiento del SFV frente a los gastos por consumo de la energía eléctrica de la red nacional para evidenciar con mayor sustento su viabilidad económica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Privada de Tacna, a través del Vice Rectorado de Investigación y del Instituto de Investigación en Energías Renovables, por el financiamiento y apoyo brindado a este grupo de trabajo para la realización del trabajo de investigación y permitir publicar los resultados de los estudios y mediciones realizados.

REFERENCIAS

- [1] L. Ferrari, “Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas”, *Revista Mexicana de Física*, vol. 59, no. 2, pp. 36-43, 2013. [En línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030971005>.
- [2] D. Rodríguez Rodríguez, “Industria y transición energética”, *ICE Revista de economía*, no. 919, 2021, doi: 10.32796/ice.2021.919.7174.
- [3] A. S. Ibarra Díaz, “El papel de las energías renovables en la sociedad”, *Revista Universitarios Potosinos*, no. 256, pp. 24-29 2021. [En línea] Disponible en: <https://leka.uaslp.mx/index.php/universitarios-potosinos/article/view/103>
- [4] A. C. Costa, D. F. de Oliveira, M. H. Rabelo, M. D. da S. L. Bravo Pinheiro, y J. Piazzarolo, “Energía solar fotovoltaica uma alternativa viável? / Photovoltaic solar energy a viable alternative?”, *Brazilian Journal of Development*, vol. 6, no. 9, 2020, doi: 10.34117/bjdv6n9-639
- [5] Naciones Unidas. “17 objetivos para transformar nuestro mundo”. Objetivos de Desarrollo Sostenible. [En Línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (consultado en 5 Abr., 2024).
- [6] C. Rovira. “Energía solar: El motor de cambio para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible”. Bright. [En línea]. Disponible en: <https://www.thinkbright.mx/blog/energia-solar-el-motor-de-cambio-para-lograr-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible> (consultado en 5 Abr., 2024).
- [7] MINEM. “Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional: marzo 2023”. Dirección General de Electricidad. [En línea]. Disponible en: <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/2%20Cifras%20preliminares%20del%20Sector%20Electrico%20-Febrero%202023a%20Rev5.pdf> (consultado en 7 Abr., 2024).
- [8] Fitch Ratings. “Sector eléctrico peruano”. Reporte Sectorial. [En línea]. Disponible en: <https://www.aai.com.pe/wp-content/uploads/2023/06/Sectorial-Sector-El%C3%A9ctrico-Dic-2022.pdf> (consultado en 7 Abr., 2024).
- [9] MINEM. “Balance Nacional de Energía 2021”. Dirección General de Eficiencia Energética. [En línea]. Disponible en: https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=664 (consultado en 7 Abr., 2024).
- [10] R. E. Mitma Ramírez, “Análisis de la regulación de energías renovables en el Perú”, *Derecho & Sociedad*, no. 45, pp. 167-176, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechoysociedad/article/view/15235>.

- [11] SENAMHI. “Atlas de Energía Solar del Perú”. Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/343>. (consultado en 7 Abr., 2024).
- [12] D. Schmerler, J. C. Velarde, A. Rodríguez, y B. Solís, “Energías renovables: experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética”, 1ra ed. Lima: Osinergmin, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/informes-publicaciones/483400-energias-renovables-experiencia-y-perspectivas-en-la-ruta-del-peru-hacia-la-transicion-energetica>.
- [13] C. A. Polo, Y. Cohaila, H. Torres, y A. de la Gala, “Caracterización térmica-energética de un sistema fotovoltaico de 3,3 KWp interconectado a la red eléctrica: 2015-2019”, *Revista Tecnía*, vol. 31, no. 1, 2021, doi: 10.21754/tecnia.v21n1.1315.
- [14] M. L. del C. Linares, E. T. Montero, y J. A. Mendoza, “La energía solar y sus beneficios en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann en Tacna, Perú”, *Ciencia Latina*, vol. 6, no. 6, 2022, doi: 10.37811/cl_rcm.v6i6.3939.
- [15] E. Mejía, “Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el suministro de energía eléctrica al laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica”, *Revista Científica Pakamuros*, vol. 7, no. 2, pp. 73-88, 2019, doi: 10.37787/9psac759.
- [16] *Sistemas Fotovoltaicos hasta 500 Wp. Especificaciones técnicas y método para la calificación energética de un sistema fotovoltaico*, NTP 399.403:2006, Indecopi, Lima, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/563001265/NORMA-TECNICA-PERUANA-SISTEMA-SOLAR-FOTOVOLTAICO-7310-399-403-1>
- [17] *Instalaciones con energía solar*, EM.080, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619726-em-080-instalaciones-con-energia-solar-ds-n-010-2009>
- [18] A. Córdova Rau, “Factores de emisión nacionales asociados con el consumo de electricidad del sistema eléctrico interconectado nacional”, Proyecto Acciones Nacionales Apropiadas de Mitigación en los sectores de generación de energía y su uso final en el Perú. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/690055328/Factores-de-Emision-Nacionales-Por-Consumos-de-Electricidad>. (consultado en 2 May., 2024).
- [19] F. J. Reguera Gil, “Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos”, tesis de maestría, Universidad Internacional de Andalucía, Andalucía, España, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10334/3524>.
- [20] P. Gonzales, F. Jurado, D. Granados y F. Ortiz, “Análisis de eficiencia y degradación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica”, *Revista Iberoamericana de Ciencias*, vol. 5, no. 6 pp. 254-275, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.reibci.org/publicados/2018/dic/3200116.pdf>.
- [21] F. I. Espinoza Canaza, “Efecto de las variaciones climáticas y atmosféricas en el rendimiento energético de los paneles solares monofaciales, Chachapoyas, Amazonas”, *Revista Científica Pakamuros*, vol. 10, no. 3, 2023, doi: 10.37787/3js88d09.
- [22] F. A. García Barrios, “Efecto de los factores ambientales en la eficiencia de arreglos de paneles solares fotovoltaicos”, tesis de maestría, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11619/3786>.
- [23] NASA. The Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) project. Langley Research Center. [En línea]. Disponible en: <https://storymaps.arcgis.com/stories/52116d331ff64e468fe9351fc1c76423> (consultado en 5 May., 2024).
- [24] D. W. Peña Montalván y R. Acuña García. “Diseño de un sistema fotovoltaico para suministrar energía eléctrica en el caserío Juan Velasco Alvarado, Chirinos-Cajamarca”, tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén, Jaén, Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/441>.
- [25] MINEM. Anuario Estadístico de Electricidad 2022. Dirección de Estudios y Promoción Eléctrica. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4742711-anuario-estadistico-de-electricidad-2022> (consultado en 8 May., 2024).
- [26] D. I. Ezquerro Delgado, “Huella ecológica del campus Capanique II de la Universidad Privada de Tacna”, tesis de pregrado, Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/3138>.
- [27] C. M. Calisaya Navarro, “Propuesta de reducción de huella de carbono mediante la generación de energía solar fotovoltaica en San Juan de Lurigancho”, tesis de pregrado, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima, Perú, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14717/919>



Los artículos publicados por la TECNIA se distribuyen bajo la licencia de uso Creative Commons (CC BY 4.0). Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo tecnia@uni.edu.pe