



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

VIABILIDAD ENERGÉTICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL BOMBEO DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LIMA, PERÚ

**ENERGY, ECONOMIC, AND ENVIRONMENTAL
FEASIBILITY OF WATER PUMPING USING PHOTOVOLTAIC
SOLAR ENERGY IN LIMA, PERU**

Josué Eliezer Alata Rey

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

José Fernando Alva Yance

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Alexis Enrique Rubio Valle

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Francisco Javier Rojas Alejandro

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Viabilidad energética, económica y ambiental del bombeo de agua con energía solar fotovoltaica en Lima, Perú

Josué Eliezer Alata Rey¹

josue@lamolina.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-1531-8516>

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

José Fernando Alva Yance

jalva@lamolina.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0001-0806-0564>

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Alexis Enrique Rubio Valle

arubiov@lamolina.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-4430-8694>

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Francisco Javier Rojas Alejandro

frojas@lamolina.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0007-0393-406X>

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

RESUMEN

El presente estudio desarrolla el dimensionamiento y la evaluación técnico-económica de un sistema de bombeo de agua alimentado con energía solar fotovoltaica, implementado como programa piloto en la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. El objetivo principal fue determinar la factibilidad de sustituir sistemas de bombeo eléctrico convencional por una alternativa sostenible basada en energía renovable. Para ello, se calculó la demanda hídrica, la altura manométrica total de bombeo y el recurso solar disponible, seleccionándose un módulo fotovoltaico de 110 Wp, una bomba superficial de corriente continua de 40 W y un regulador de carga de 10 A. Los resultados evidencian que el sistema diseñado satisface una demanda diaria de 3 m³ de agua, con un periodo de retorno de inversión de 3,5 años y una reducción estimada de 58,86 kg de CO₂ por año. Se concluye que el bombeo fotovoltaico de baja potencia constituye una alternativa viable para aplicaciones institucionales y rurales, al permitir la reducción de costos energéticos y de emisiones asociadas a la generación eléctrica convencional. Asimismo, el estudio aporta una metodología replicable para proyectos de eficiencia energética y sostenibilidad en el abastecimiento de agua.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica; Bombeo de agua; Dimensionamiento de sistemas; Evaluación técnico-económica; Sostenibilidad ambiental

¹ Autor principal

Correspondencia: josue@lamolina.edu.pe

Energy, economic, and environmental feasibility of water pumping using photovoltaic solar energy in Lima, Peru

ABSTRACT

This study presents the sizing and techno-economic evaluation of a water pumping system powered by photovoltaic solar energy, implemented as a pilot program at Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru. The main objective was to determine the feasibility of replacing conventional electric pumping systems with a sustainable renewable-energy-based alternative. Water demand, total pumping head, and available solar resources were calculated, leading to the selection of a 110 Wp photovoltaic module, a 40 W direct-current surface pump, and a 10 A charge controller. The results show that the designed system meets a daily water demand of 3 m³, with a payback period of 3.5 years and an estimated reduction of 58.86 kg of CO₂ per year. It is concluded that low-power photovoltaic pumping is a viable alternative for institutional and rural applications, as it reduces energy costs and emissions associated with conventional electricity generation. In addition, this study provides a replicable methodology for energy efficiency and sustainability projects in water supply systems.

Keywords: Photovoltaic solar energy; Water pumping; System sizing; Techno-economic evaluation; Environmental sustainability

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



INTRODUCCIÓN

El presente artículo analiza el bombeo de agua mediante sistemas alimentados con energía solar fotovoltaica, tecnología que se ha consolidado como una alternativa eficiente, sostenible y técnicamente viable frente a los sistemas convencionales dependientes de la red eléctrica o de combustibles fósiles. Diversos estudios destacan su aplicabilidad en zonas rurales y aisladas, así como su potencial para reducir costos operativos y emisiones asociadas al uso de fuentes energéticas convencionales (Chandel et al., 2016)

El problema de investigación se sustenta en la alta dependencia energética de los sistemas de bombeo convencionales empleados en instituciones públicas y zonas rurales del Perú, cuyo funcionamiento basado en electricidad de la red o en combustibles fósiles genera costos operativos significativos y contribuye al incremento de la huella de carbono. En este contexto, resulta pertinente evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de los sistemas de bombeo alimentados con energía solar fotovoltaica, debido a su potencial para reducir el consumo de energía convencional, mejorar la sostenibilidad del abastecimiento de agua y favorecer su aplicación en entornos institucionales y rurales (Gevorkov et al., 2023).

La relevancia del estudio radica en la necesidad de diversificar las fuentes de energía y reducir la demanda eléctrica en servicios de uso institucional, como los sistemas de abastecimiento de agua en servicios higiénicos de universidades y entidades públicas. Asimismo, la transición hacia tecnologías limpias contribuye al cumplimiento de los compromisos nacionales e internacionales en materia de mitigación del cambio climático, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 7, referido al acceso a energía asequible, segura, sostenible y moderna, y el ODS 13, orientado a la acción climática [10]. El estudio se sustenta en los principios de la conversión fotovoltaica y su aplicación en sistemas de bombeo de agua. El marco conceptual se apoya en los aportes de Alonso Abella (2001), sobre diseño y dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas; Cervantes Herrejón (2009), quien estudió criterios de rendimiento en sistemas de bombeo solar; y Castro Gil (2003), quien analizó la eficiencia de sistemas de bombeo eólico y fotovoltaico. Los conceptos centrales que estructuran esta investigación son irradiancia solar, eficiencia del conjunto

motor-bomba, rendimiento energético y periodo de retorno de inversión, variables fundamentales para el análisis técnico y económico del sistema.

Entre los antecedentes relevantes, Cruz Baldán (2011) evaluó el ahorro energético mediante bombeo solar y destacó su viabilidad en zonas agrícolas; Domínguez González (2012) diseñó un sistema fotovoltaico para generación eléctrica en México; y Herrera (2006) determinó parámetros de rendimiento en sistemas de riego fotovoltaico en el Perú. Sin embargo, son limitados los estudios que documentan aplicaciones experimentales de baja potencia en instituciones educativas urbanas, lo que evidencia una brecha científica y tecnológica. En ese sentido, el presente artículo aporta evidencia experimental y una metodología replicable para el dimensionamiento y evaluación de sistemas de bombeo solar fotovoltaico a pequeña escala, bajo condiciones reales de operación en Lima.

La investigación se desarrolla en el contexto urbano y climático de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicada en Lima, Perú, donde los niveles de radiación solar permiten evaluar el potencial de los sistemas fotovoltaicos para el suministro de agua en servicios sanitarios. Este entorno constituye un escenario adecuado para ensayar soluciones sostenibles de bajo costo, con posibilidades de replicación en instituciones públicas y comunidades rurales del país.

Como hipótesis de trabajo, se plantea que la implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico de baja potencia es técnicamente viable, económicamente rentable y ambientalmente favorable en comparación con un sistema de bombeo convencional. El objetivo general de la investigación es diseñar, dimensionar y evaluar el rendimiento técnico y la viabilidad económica de un sistema de bombeo solar fotovoltaico aplicado al abastecimiento de agua en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los objetivos específicos son: determinar la demanda hídrica y las condiciones de operación del sistema; dimensionar los componentes principales, como el módulo fotovoltaico, la bomba y el regulador de carga; analizar la eficiencia energética y el periodo de retorno de inversión; y estimar los beneficios ambientales derivados de la reducción de emisiones de CO₂.

1. METODOLOGÍA

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, sustentado en la medición objetiva de variables técnicas, energéticas y económicas asociadas al desempeño de un sistema de bombeo solar fotovoltaico. Se emplearon procedimientos numéricos y experimentales para estimar la eficiencia del sistema, el caudal

bombeado, el consumo energético y el retorno económico. De manera complementaria, se realizó una revisión documental de normas técnicas y estudios previos vinculados con el diseño, dimensionamiento y operación de sistemas fotovoltaicos de bombeo.

La investigación es de tipo aplicada y descriptiva, debido a que busca validar la aplicación práctica de principios teóricos de la energía solar fotovoltaica en un entorno real, describiendo el comportamiento del sistema bajo condiciones climáticas específicas de Lima. Asimismo, presenta componentes explicativos, al analizar la relación entre la irradiancia solar, la potencia suministrada por el módulo fotovoltaico y el volumen de agua bombeado.

El diseño de investigación corresponde a un estudio experimental de campo, desarrollado como piloto longitudinal de corta duración, ya que los datos fueron recolectados durante un periodo definido para evaluar el desempeño del sistema instalado. El estudio se realizó en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en el distrito de La Molina, Lima, Perú, a una altitud aproximada de 240 m s. n. m. y en las coordenadas 12,08° S y 76,95° O. El sistema fue aplicado como programa piloto en los servicios higiénicos de un módulo educativo de la universidad.

La población de estudio estuvo conformada por los sistemas de bombeo de agua empleados en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina. La muestra correspondió al sistema seleccionado para el piloto: una instalación de bombeo de baja potencia destinada a abastecer un consumo aproximado de 3 m³ de agua por día. La unidad de análisis fue el sistema de bombeo fotovoltaico compuesto por módulo solar, bomba, regulador de carga y conductores eléctricos.

Las técnicas de recolección de datos incluyeron mediciones experimentales, observación estructurada y registro de variables meteorológicas. Se utilizó un piranómetro digital para medir la irradiancia solar directa y global, expresada en W/m²; un multímetro digital para registrar la tensión y la corriente del módulo fotovoltaico y del sistema de bombeo; y un termómetro infrarrojo para determinar la temperatura superficial del módulo. Además, se empleó una ficha de registro técnico elaborada por los investigadores para consignar datos de caudal, tiempo de bombeo y rendimiento del sistema. Las mediciones se realizaron entre las 10:00 y las 14:00 horas durante un día crítico del mes de julio, considerado como uno de los periodos de menor irradiancia anual en Lima.

Los instrumentos y materiales de apoyo incluyeron un módulo fotovoltaico de 110 Wp, marca ISOFOTON; una bomba superficial de corriente continua de 40 W, marca LORENTZ; un regulador de carga de 10 A; cables eléctricos tipo THW de 2,5 mm² y 4 mm²; y tuberías de PVC de 25,4 mm de diámetro. El diseño experimental consideró la evaluación integral del sistema, tomando en cuenta la irradiancia solar, el caudal de bombeo y la energía entregada por el módulo fotovoltaico.

Respecto de las consideraciones éticas, el estudio no involucró experimentación con seres humanos ni animales. Se respetaron los protocolos de seguridad eléctrica, así como las disposiciones del Código Nacional de Electricidad y la Norma Técnica de Edificación EM.080, referida a instalaciones con energía solar. Asimismo, se contó con autorización institucional para el uso de las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina y para la manipulación de los equipos fotovoltaicos empleados en el piloto.

Los criterios de inclusión consideraron sistemas de bombeo existentes con operación eléctrica convencional y disponibilidad de espacio para la instalación del módulo fotovoltaico. Se excluyeron sistemas con bombas sumergibles de alta potencia o instalaciones sin acceso directo a la medición de caudal, tensión y corriente.

Las principales limitaciones del estudio estuvieron asociadas a la variabilidad de las condiciones meteorológicas durante la toma de datos, la ausencia de instrumentación automatizada para registrar variables en tiempo real y la restricción de realizar mediciones durante un único periodo estacional. No obstante, los resultados obtenidos son representativos para sistemas de bombeo fotovoltaico de baja potencia operando bajo condiciones urbanas de Lima.

La metodología propuesta permite garantizar la replicabilidad del estudio y fortalecer su validez interna y externa, al integrar procedimientos de cálculo, medición empírica y análisis económico bajo condiciones controladas. De este modo, se proporciona un modelo transferible para la implementación de sistemas similares en instituciones educativas y comunidades rurales.

2.1. Ubicación y contexto del estudio

La investigación se desarrolló en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicada en Lima, Perú, a una latitud de 12°08' S, longitud de 76°95' O y altitud promedio de 240 m s. n. m. El área de estudio presenta un clima árido subhúmedo, con disponibilidad de recurso solar

suficiente para la operación de sistemas fotovoltaicos de baja potencia. Según información obtenida mediante el simulador profesional PVSYST versión 8, la radiación solar media anual en la zona alcanza valores favorables para aplicaciones de bombeo solar, lo que convierte al campus universitario en un escenario adecuado para la evaluación experimental del sistema.

2.2. Procedimiento experimental

2.2.1. Determinación de la demanda hídrica

La demanda diaria de agua en los servicios higiénicos del área piloto se estimó considerando el número de usuarios, la frecuencia de uso y el caudal promedio de los puntos de consumo. El volumen total diario se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$V_d = n \times q \times t \quad [1]$$

Donde: V_d representa la demanda diaria de agua, expresada en L/día; n corresponde al número de usuarios; q es el caudal medio de consumo por usuario, expresado en L/min; y t representa el tiempo promedio de uso, expresado en min/usuario.

A partir de tablas de consumo de agua, se determinó una demanda de 3 m³/día, valor utilizado como base para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de bombeo.

2.2.2. Cálculo de la altura manométrica total de bombeo

La altura manométrica total considera la diferencia de elevación geométrica entre el punto de succión y el punto de descarga, así como las pérdidas de carga generadas por fricción en tuberías y accesorios. Para su cálculo se empleó la siguiente ecuación:

$$H_t = H_g + H_f \quad [2]$$

Donde: H_t es la altura total de bombeo, expresada en metros; H_g corresponde a la altura geométrica, expresada en metros; y H_f representa las pérdidas de carga, calculadas mediante el método de Darcy-Weisbach.

El valor obtenido para la instalación experimental fue de 6 m, correspondiente a las condiciones reales del sistema evaluado.

2.2.3. Cálculo de potencia mecánica requerida y dimensionamiento fotovoltaico

La potencia mecánica mínima requerida para el bombeo se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$P_m = \rho \times g \times Q \times H_t / \eta_s \quad [3]$$

Donde: ρ es la densidad del agua, equivalente a 1000 kg/m³; g es la aceleración de la gravedad, equivalente a 9,81 m/s²; Q es el caudal, expresado en m³/s; H_t es la altura total de bombeo, expresada en metros; y η_s corresponde a la eficiencia de la bomba.

El cálculo permitió estimar una potencia mecánica aproximada de 35 W, por lo que se seleccionó una bomba de corriente continua de 40 W. Posteriormente, la potencia eléctrica requerida se ajustó considerando la eficiencia del sistema mediante la siguiente expresión:

$$P_e = P_m / \eta_c \quad [4]$$

Donde η_c representa la eficiencia combinada del regulador, estimada aproximadamente en 0,9.

2.2.4. Selección de los componentes del sistema

Con base en los cálculos realizados y en la información técnica de los fabricantes, se seleccionaron los siguientes componentes: un módulo fotovoltaico de 110 Wp, una bomba superficial de 40 W a 12 VDC, un controlador de carga PWM de 10 A, tuberías de PVC de 25,4 mm y accesorios para una longitud total aproximada de 10 m.

El sistema se configuró en corriente continua directa, con el propósito de minimizar las pérdidas por conversión energética y mejorar la eficiencia global del sistema de bombeo.

2.3. Monitoreo y medición de parámetros

Con el fin de corroborar los valores de radiación solar obtenidos mediante el simulador PVSYST versión 8, se realizaron mediciones experimentales de irradiancia solar, expresada en W/m², y de temperatura superficial del módulo fotovoltaico. Asimismo, se registraron los parámetros eléctricos del sistema, tales como tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito. Las mediciones se efectuaron cada 10 minutos, entre las 10:00 y las 14:00 horas, durante un día del mes de julio, empleando un piranómetro y multímetros digitales calibrados.

Adicionalmente, se realizaron mediciones en la electrobomba convencional con el propósito de determinar el rendimiento del motor eléctrico. La eficiencia del motor se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{\text{motor}} = P_{\text{eje}} / P_{\text{activa}} \quad [5]$$

Donde P_{eje} corresponde a la potencia nominal indicada en la placa del motor, equivalente a 1 HP, y P_{activa} representa la potencia eléctrica absorbida por el motor monofásico, calculada mediante la siguiente expresión:

$$P_{\text{activa}} = V \times I \times \cos\phi \quad [6]$$

Donde V es la tensión eléctrica, I es la corriente y $\cos\phi$ corresponde al factor de potencia.



2.4. Evaluación económica y ambiental

El análisis económico consideró la inversión inicial, los costos anuales de mantenimiento y el ahorro energético obtenido respecto del sistema de bombeo convencional. El periodo de retorno de inversión se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$PRI = I_0 / (A_e - C_m) \quad [7]$$

Donde I_0 corresponde a la inversión inicial, A_e representa el ahorro energético anual y C_m corresponde al costo de mantenimiento anual.

La evaluación ambiental se basó en la reducción de emisiones de dióxido de carbono derivada de la sustitución de electricidad de red por energía solar fotovoltaica. Para ello, se aplicó un factor de emisión promedio de 0,15 kg CO₂/kWh, correspondiente a la matriz eléctrica peruana.

2.5 Validación del modelo experimental

Los resultados obtenidos fueron contrastados con los valores teóricos derivados de la simulación y de los métodos de dimensionamiento descritos por Alonso Abella (2001) y Cervantes Herrejón (2009). Asimismo, los datos experimentales fueron comparados de manera descriptiva con los valores teóricos obtenidos mediante procedimientos de dimensionamiento fotovoltaico e hidráulico.

2. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos durante la instalación y prueba del sistema de bombeo fotovoltaico en la Universidad Nacional Agraria La Molina permiten evaluar su factibilidad técnica, rendimiento energético y viabilidad económica. La información experimental se organizó en tres dimensiones de análisis: desempeño energético del sistema fotovoltaico, dimensionamiento hidráulico y rendimiento del bombeo, y evaluación técnico-económica y ambiental.

3.1. Desempeño energético del sistema fotovoltaico

Durante las mediciones realizadas entre las 10:00 y las 14:00 horas, con intervalos de 10 minutos, el módulo fotovoltaico de 110 Wp registró una irradiancia media diaria de 6,07 kWh/m²/día, con valores máximos cercanos a 580,6 W/m². La temperatura superficial del módulo se mantuvo entre 40 °C y 50 °C. El voltaje promedio de circuito abierto fue de 12,6 V, mientras que la corriente de cortocircuito alcanzó 5,24 A bajo condiciones óptimas de radiación.

Estos valores evidencian que el módulo fotovoltaico operó alrededor del 85 % de su potencia nominal, lo cual concuerda con lo reportado por Cervantes Herrejón (2009) y Castro Gil (2003), quienes identificaron niveles de eficiencia similares en condiciones reales de campo. La eficiencia global del sistema módulo-bomba, considerando pérdidas térmicas y eléctricas, fue de 50 %, valor representativo para sistemas fotovoltaicos de baja potencia sin seguidor solar.

El análisis de la curva corriente-tensión mostró un punto de máxima potencia estable en torno a 94 W, con un factor de acoplamiento de 0,85. Este resultado confirma el adecuado comportamiento del sistema y la correcta selección de sus componentes, evidenciando la capacidad del módulo fotovoltaico para suministrar energía suficiente al motor de corriente continua sin requerir almacenamiento intermedio durante las horas solares útiles.

Tabla 1

Evolución temporal de la irradiancia, temperatura de operación y parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico.

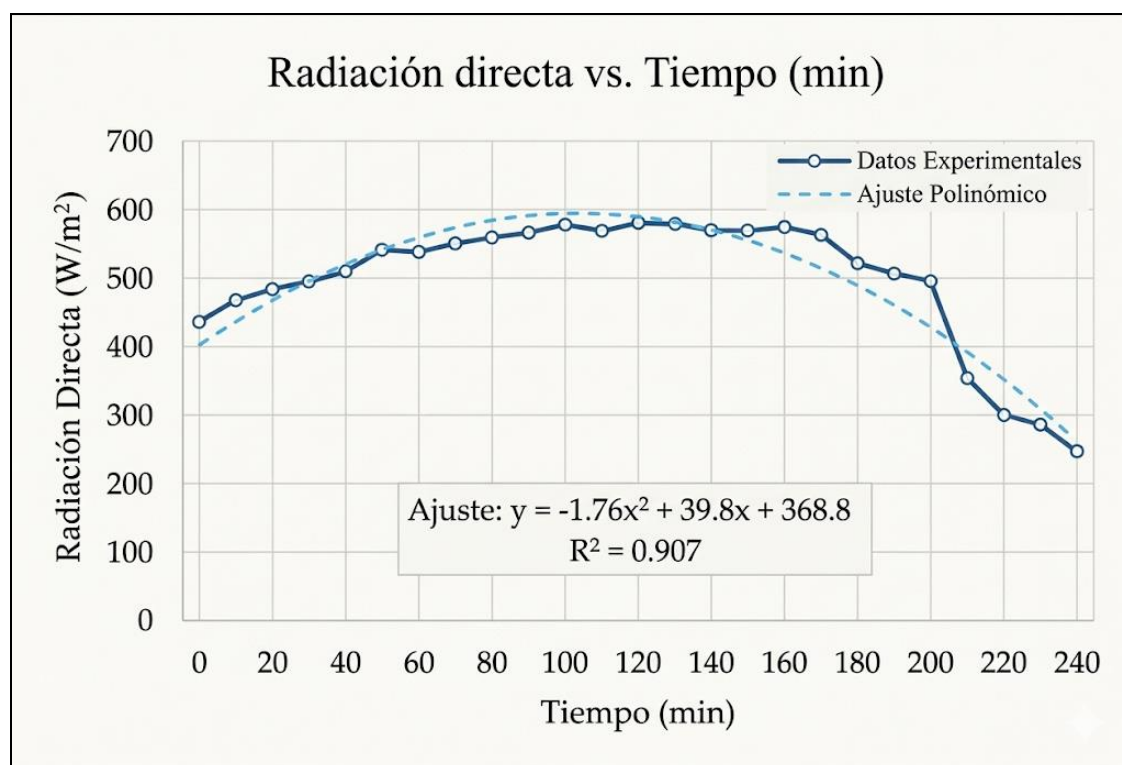
Hora	Radiación directa (W/m ²)	Temperatura del panel (°C)	Voc (V)	Icc(A)
10:00	436.0	40	12.76	3.89
10:10	467.9	42	12.74	4.20
10:20	482.7	45	12.69	4.23
10:30	492.7	45	12.63	4.41
10:40	509.4	46	12.57	4.56
10:50	541.2	46	12.60	4.84
11:00	538.6	46	12.63	4.86
11:10	550.9	45	12.60	4.99
11:20	558.8	46	12.62	5.02
11:30	566.8	47	12.61	5.07
11:40	578.7	47	12.68	5.19
11:50	569.4	47	12.59	5.11
12:00	580.6	50	12.62	5.24
12:10	577.4	49	12.64	5.15
12:20	568.1	46	12.63	5.15
12:30	569.1	46	12.68	5.07
12:40	572.6	46	12.61	5.14
12:50	564.5	46	12.68	5.07
13:00	521.4	45	12.73	4.71
13:10	506.9	46	12.63	4.59
13:20	495.2	48	12.54	4.43

13:30	355.4	44	12.67	2.34
13:40	301.3	44	12.68	4.40
13:50	286.4	40	12.75	2.28
14:00	245.4	40	12.72	4.17

Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

Figura 1

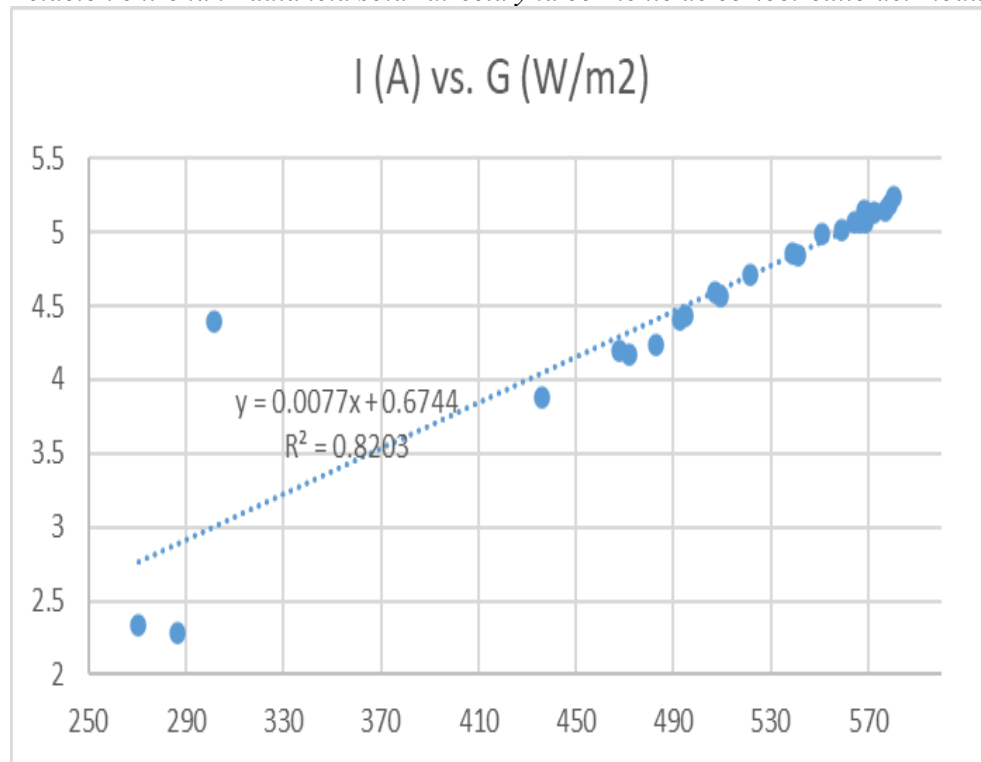
Variación temporal de la irradiancia solar directa durante el periodo de medición



Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

Figura 2

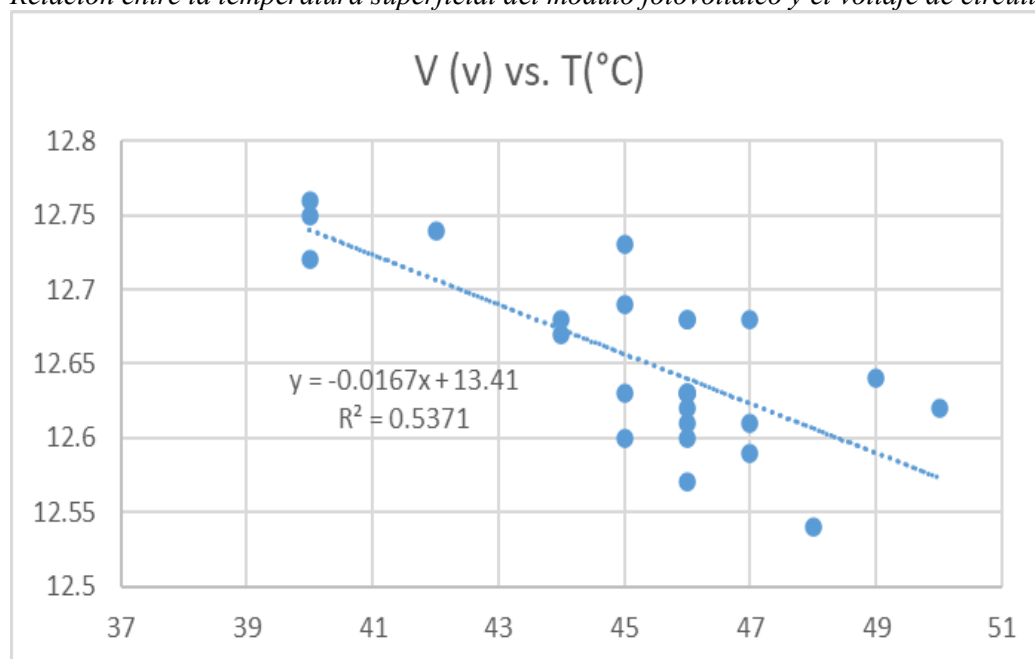
Relación entre la irradiancia solar directa y la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico.



Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

Figura 3

Relación entre la temperatura superficial del módulo fotovoltaico y el voltaje de circuito abierto.



Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

3.2. Dimensionamiento hidráulico y rendimiento del sistema de bombeo solar

El sistema logró bombear un caudal promedio de 1,25 m³/h a una altura equivalente de bombeo de 6 m, satisfaciendo una demanda de 3 m³/día en un periodo aproximado de 2,4 horas. La bomba superficial de corriente continua de 40 W presentó un rendimiento hidráulico de 85 % y una eficiencia total de 42 %, valores coherentes con los rangos reportados por Cruz Baldán (2011) y Herrera (2006) para sistemas de bombeo fotovoltaico de pequeña escala.

En comparación con el sistema eléctrico convencional utilizado previamente, compuesto por una electrobomba de 1 HP a 220 V, el sistema fotovoltaico permitió eliminar el consumo de energía eléctrica proveniente de la red durante el periodo de prueba, al cubrir la demanda energética de bombeo mediante generación solar directa. Este resultado evidencia una cobertura energética total durante las horas evaluadas y refuerza la autosuficiencia operativa del sistema.

En la Tabla 2 se presentan las características técnicas de la bomba eléctrica convencional instalada en los servicios sanitarios de la universidad, la cual opera de forma diaria.

Tabla 2*Características técnicas del sistema de bombeo convencional (actual) para los servicios sanitarios*

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDADES
	D	
Potencia nominal bomba	1	HP
Voltaje nominal	220	VAC
Corriente nominal	5.7	A
Caudal (dato de placa)	50	L/min
Altura del pozo al tanque	6.0	m
Volumen del tanque	3	m ³

Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las mediciones efectuadas a la bomba eléctrica convencional durante su periodo de operación.

Tabla 3*Mediciones realizadas a la bomba eléctrica convencional*

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDADES
	D	
Voltaje	224.3	voltios
Corriente	5.23	amperios
Factor de potencia	0.93	-
Potencia activa	1090.97	Watts
Eficiencia	68%	-
Factor de utilización	92%	-

Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

En la Tabla 4 se presenta el costo energético anual del sistema de bombeo convencional correspondiente a un servicio sanitario del campus universitario, considerando el consumo mensual y anual promedio.

Tabla 4*Costo anual energético del sistema de bombeo actual*

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDADES
Volumen promedio de agua bombeada por día	3	m ³
Consumo de energía eléctrica promedio al mes	32.70	kWh
Costo unitario de la energía eléctrica activa	0.50	Soles/kWh
Costo energético mensual de bombeo en un servicio sanitario	16.35	Soles
Costo energético anual de bombeo en un servicio sanitario	196.20	Soles

Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

En la Tabla 5 se presenta la inversión parcial requerida para implementar un sistema de bombeo fotovoltaico en un servicio sanitario del campus universitario, considerando que algunos materiales y equipos ya se encontraban disponibles.

Tabla 5*Inversión de un sistema de bombeo solar para un servicio sanitario de la universidad*

DESCRIPCIÓN	COSTO (S/.)
Panel solar 110W, 12 V	200.00
Bomba superficial 40 W – 12 V	400.00
Regulador de carga 10 A	100.00
COSTO TOTAL DEL SISTEMA	700.00

Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

3.3. Análisis técnico-económico

El costo total de inversión del sistema piloto fue de S/ 700,00, equivalente aproximadamente a USD 205, considerando el módulo fotovoltaico, la bomba, el regulador de carga, el cableado y los accesorios principales. En contraste, el costo anual de energía eléctrica del sistema convencional ascendía a S/ 196,20. Bajo este escenario, el periodo de retorno de inversión se estimó en 3,5 años, valor que se encuentra dentro de un rango favorable para proyectos fotovoltaicos de pequeña escala en contextos urbanos.

Asimismo, considerando una vida útil promedio de 20 años para el módulo fotovoltaico y de 8 años para la bomba, el ahorro acumulado en energía eléctrica se proyecta por encima de S/ 3924,00 durante el ciclo de operación. Este resultado coincide con los hallazgos de Domínguez González (2012), quien

evidenció que los sistemas fotovoltaicos pueden presentar periodos de retorno competitivos en instalaciones institucionales ubicadas en zonas con disponibilidad adecuada de recurso solar.

En la Tabla 6 se muestra el beneficio económico asociado a la inversión parcial requerida para implementar el sistema de bombeo fotovoltaico en un servicio sanitario del campus universitario.

Tabla 6

Beneficio económico con la inversión parcial para un servicio sanitario

DESCRIPCIÓN	COSTO
Inversión parcial en un servicio sanitario, en soles	700.00
Ahorro anual en consumo energético, en soles	196.20
Retorno (años)	3,5

Nota. Elaboración propia con base en mediciones experimentales realizadas en el sistema piloto

3.4. Beneficio ambiental

La sustitución del sistema eléctrico convencional por el sistema de bombeo fotovoltaico permitiría evitar aproximadamente 392,40 kWh/año de consumo eléctrico proveniente de la red. Considerando un factor de emisión de 0,15 kg CO₂/kWh, la reducción estimada sería de 58,86 kg de CO₂/año.

Históricamente, el sistema eléctrico peruano se ha caracterizado por presentar un factor de emisión relativamente bajo en comparación con otros países, debido a la participación significativa de la generación hidroeléctrica en la matriz energética nacional. Estudios técnicos recientes sitúan este valor en un rango aproximado de 0,120 a 0,180 tCO₂e/MWh. Por ello, para efectos de este análisis se consideró un factor promedio de 0,15 tCO₂/MWh para la matriz eléctrica peruana.

El resultado obtenido reafirma el potencial de la energía solar fotovoltaica para contribuir a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 7, referido a energía asequible y no contaminante, y el ODS 13, orientado a la acción por el clima.

3.5. Discusión de resultados

Los hallazgos del estudio confirman que los sistemas de bombeo fotovoltaico de baja potencia son técnica y económicamente viables para aplicaciones institucionales y rurales en regiones con niveles adecuados de irradiancia solar. Los resultados de rendimiento energético y retorno económico son consistentes con los reportados por Cervantes Herrejón (2009), Cruz Baldán (2011) y Herrera (2006),

quienes destacaron la estabilidad operativa, el bajo mantenimiento y la pertinencia de este tipo de sistemas en aplicaciones de pequeña escala.

No obstante, se identificaron limitaciones asociadas a la variabilidad diaria del recurso solar y a la necesidad de implementar mantenimiento preventivo en la bomba superficial, especialmente en ambientes con humedad o exposición a condiciones variables de operación. Asimismo, se recomienda incorporar sistemas de monitoreo automatizado, con el fin de mejorar la precisión de los datos, facilitar el seguimiento del desempeño y optimizar el control operativo del sistema.

En síntesis, la investigación demuestra que la implementación de un sistema de bombeo solar fotovoltaico permite reducir los costos energéticos, disminuir las emisiones de CO₂ y fortalecer la autonomía operativa de instituciones públicas. Su replicabilidad en otros campus universitarios y comunidades rurales del Perú representa una oportunidad concreta para avanzar hacia una transición energética descentralizada, sostenible y adaptada a las condiciones locales.

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. CONCLUSIONES

- a) El sistema de bombeo de agua alimentado con energía solar fotovoltaica demostró un funcionamiento estable bajo las condiciones climáticas de Lima, alcanzando una potencia efectiva aproximada de 94 W. La configuración seleccionada, compuesta por un módulo fotovoltaico de 110 Wp, una bomba superficial de corriente continua de 40 W y un regulador de carga de 10 A, permitió satisfacer una demanda diaria de 3 m³ de agua con una eficiencia global de bombeo de 42 %.
- b) El sistema operó de manera autónoma durante las horas solares evaluadas, cubriendo la demanda hídrica diaria del módulo piloto bajo las condiciones experimentales registradas. Este desempeño evidencia que los sistemas fotovoltaicos de baja potencia pueden constituir una alternativa confiable para aplicaciones institucionales y rurales, sin depender directamente de la infraestructura eléctrica convencional.
- c) Con una inversión inicial de S/ 700,00 y un ahorro anual estimado de S/ 196,20, el proyecto presentó un periodo de recuperación de 3,5 años, lo que confirma su viabilidad económica en el corto plazo. La vida útil proyectada de los componentes principales permite prever beneficios

acumulados significativos durante el periodo de operación, con costos de mantenimiento reducidos.

- d) El uso de energía solar fotovoltaica en sustitución de electricidad convencional permitió estimar una reducción aproximada de 58,86 kg de CO₂/año, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con energía limpia y acción climática.
- e) El estudio aporta una metodología experimental replicable para el dimensionamiento, evaluación técnica y análisis económico de sistemas de bombeo fotovoltaico de baja potencia. Su implementación constituye una referencia práctica para proyectos de eficiencia energética y sostenibilidad hídrica en universidades, instituciones públicas y comunidades rurales del Perú.

4.2. Recomendaciones

- a) Se recomienda replicar el estudio en zonas rurales, altoandinas y costeras del país con diferentes niveles de irradiancia solar, a fin de evaluar la variabilidad del rendimiento del sistema y su adaptabilidad a diversos contextos ambientales.
- b) Se sugiere incorporar sensores digitales y sistemas de adquisición de datos en tiempo real para obtener mediciones más precisas de irradiancia, caudal, potencia eléctrica y eficiencia del sistema, lo que permitiría mejorar la gestión operativa y el mantenimiento preventivo.
- c) Se recomienda ampliar la escala de aplicación del sistema hacia redes internas de abastecimiento de agua potable y sistemas de riego agrícola, evaluando comparativamente el desempeño de bombas centrífugas, de diafragma y de desplazamiento positivo.
- d) Las universidades y entidades públicas deberían promover programas institucionales de transición energética, orientados a la sustitución progresiva de equipos eléctricos convencionales por tecnologías solares fotovoltaicas, especialmente en servicios de operación continua o recurrente.
- e) Se recomienda desarrollar futuras líneas de investigación vinculadas con almacenamiento energético, gestión hídrica inteligente, automatización del bombeo y análisis de ciclo de vida de los componentes fotovoltaicos, con el propósito de evaluar la sostenibilidad integral de los sistemas de bombeo solar.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso Abella, M. (2001). Sistemas fotovoltaicos: Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones fotovoltaicas. Editorial Técnicas Reunidas.
- Castro Gil, M. A. (2003). Sistemas de bombeo eólico y fotovoltaico. Universidad Politécnica de Madrid.
- Chandel, S. S., Naik, M. N., & Chandel, R. (2016). *Solar photovoltaic water pumping system: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 1038–1067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>
- Cervantes Herrejón, J. (2009). Estudios de sistemas de bombeo fotovoltaico. Universidad Autónoma de México.
- Código Nacional de Electricidad. (2011). Instalaciones eléctricas en baja tensión. Ministerio de Energía y Minas del Perú.
- Cruz Baldán, L. (2011). Estudio del ahorro mediante bombeo solar. Instituto de Energías Renovables.
- Domínguez González, R. (2012). Diseño de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en el Cobaev 35 Xalapa. Universidad Veracruzana.
- Fondo Nacional del Ambiente. (2015). Herramienta para la estimación de las reducciones de CO₂: Generación eléctrica por energías renovables para la red interconectada. FONAM-Banco Mundial. <https://www.fonamperu.org/>
- Gevorkov, L., Domínguez-García, J. L., & Trilla Romero, L. (2023). *Review on Solar Photovoltaic-Powered Pumping Systems*. Energies, 16(1), 94. <https://doi.org/10.3390/en16010094>
- Gopal, C., Mohanraj, M., Chandramohan, P., & Chandrasekar, P. (2015). *Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 1084–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- Guerediaga Zuriarrain, I. (2004). Diseño de una instalación de energía solar fotovoltaica para generación de energía eléctrica y bombeo de agua en un centro de salud. Universidad del País Vasco.



- Herrera, W. (2006). Determinación de parámetros que influyen en el bombeo fotovoltaico en dos sistemas de riego: directo a baja presión y con tanque elevado. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Ikeda, T., Lio, S. and Tatsumo, K. (2010). Performance of nano-hydraulic turbine utilizing waterfalls. [Renewable Energy](https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.004), 35(1), 293 – 300. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.004>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). Norma técnica de edificación EM.080: Instalaciones con energía solar. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Mora, J. (2010). Evaluación de un sistema de riego localizado de baja presión con bombeo fotovoltaico. Universidad de Costa Rica.
- Organización de las Naciones Unidas. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible: Energía asequible y no contaminante; acción por el clima. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>