

PROTOTIPO DIDÁCTICO DE SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA - UNSCH – 2020

Castañeda Esquén, Carlos Augusto
Programa de Investigación en Agua y Energía
Área de Energía
carlos.castaneda@unsch.edu.pe

RESUMEN

El presente trabajo de investigación ha permitido seleccionar los componentes de un sistema de bombeo de acuerdo a las condiciones de operación y características de los equipos; para la puesta en marcha y simulación del sistema de iluminación y bombeo de agua con bomba sumergible se ha construido el prototipo compuesto por un generador solar fotovoltaico con dos baterías. En la investigación se examinaron los datos de la irradiación solar, voltaje, intensidad de corriente, potencia, altura manométrica y caudal, la investigación consistió en construir el prototipo de bombeo solar fotovoltaico con una bomba sumergible de corriente continua de 24 V y 300 W y la instalación para una lámpara de 50 W y 220 V en corriente alterna. La parte experimental se llevó a cabo con la validación del prototipo obteniéndose las curvas, características principales, utilizando para ello equipos de medición de variables meteorológicas y de medición de corriente y voltaje.

El generador fotovoltaico consta de un panel fotovoltaico de 270 W y 24 V, dos baterías de 12 V 110 AH conectadas en serie. El prototipo permitirá ser una guía que faciliten la enseñanza y aprendizaje en el Curso de Energías Renovables; de igual manera permitirá implementar un sistema de bombeo de mayor capacidad.

Palabras claves: Sistema de bombeo, generador fotovoltaico, prototipo didáctico.

DIDACTIC PROTOTYPE OF WATER PUMPING SYSTEM WITH PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY - UNSCH - 2020

ABSTRACT

The present research work has allowed to select the components of a pumping system according to the operating conditions and characteristics of the equipment; The prototype consisting of a photovoltaic solar generator with two batteries has been built for the start-up and simulation of the lighting and water pumping system with a submersible pump. In the investigation, the data of solar irradiation, voltage, current intensity, power, manometric height and flow were examined, the investigation consisted of building the photovoltaic solar pumping prototype with a submersible pump of direct current of 24 V and 300 W and the installation for a lamp of 50 W and 220 V in alternating current. The experimental part was carried out with the validation of the prototype, obtaining the curves, main characteristics, using equipment for measuring meteorological variables and for measuring current and voltage.

The photovoltaic generator consists of a 270 W 24 V photovoltaic panel, two 12 V 110 AH batteries connected in series. The prototype will serve as a guide to facilitate teaching and learning in the Renewable Energies Course; in the same way, it will allow to implement a pumping system with greater capacity.

Key words: Pumping system, photovoltaic generator, didactic prototype.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tuvo como propósito realizar un prototipo didáctico de un sistema para bombear agua con energía solar fotovoltaica, habiéndose realizado previamente los cálculos que han permitido la selección de los equipos para la instalación del módulo.

Actualmente, el bombeo solar es una tecnología popular, útil y rentable por su facilidad de uso en diferentes campos de aplicación como el suministro de agua a zonas remotas en donde no es accesible la energía eléctrica; llevar agua potable a las casas, abastecer agua para el ganado y para el riego, entre otros (Asmat, 21018). Los sistemas fotovoltaicos de bombeo pueden satisfacer un amplio rango de necesidades que van desde 1,000 litros diarios para abreviar pequeños hatos o para consumo humano y hasta 50,000 litros diarios para hatos más grandes e irrigación de pequeñas parcelas. Estos sistemas son modulares, de manera que pueden optimizarse para las características específicas de cada

proyecto (Rochin, Ortiz y Ellis, s.f).

La energía solar fotovoltaica aplicada a sistemas de bombeo resulta una opción conveniente en la región de Ayacucho por su alto nivel de radiación, lo que permite instalar pequeños sistemas de bombeo de agua en lugares aislados, previo diseño para un adecuado dimensionamiento y así el sistema opere dentro de los parámetros óptimos.

Por lo que se hace necesario un estudio de los parámetros más importantes de dicho sistema: índice de radiación solar, número de paneles fotovoltaicos y sus características eléctricas del sistema de generación, acoplamiento entre el generador y el conjunto motor – bomba, pérdidas de potencia, el caudal y la eficiencia del sistema.

El contar con un prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico permite realizar mediciones en configuraciones distintas, evaluar y hacer mejoras en los diseños de sistemas de bombeo fotovoltaico, además permite desarrollar un método de enseñanza que muestre los componentes del

sistema y entrenar a los estudiantes en el uso de los sistemas fotovoltaicos en sistemas de bombeo.

Con la presente investigación se pretende exponer de manera clara parte de la información necesaria de los componentes que conforman el sistema de bombeo, poner en funcionamiento y realizar simulación del sistema de bombeo autónomo con bomba sumergible, alimentado por un generador solar fotovoltaico.

La función principal de este prototipo, es la extracción de agua mediante bomba sumergible, alimentado por un generador fotovoltaico que transforma la energía proveniente del sol en energía eléctrica de corriente continua.

El prototipo construido consta de un panel fotovoltaico de 270 W y 24 V, dos baterías en serie de 12 V 110 AH cada una, regulador de carga de la batería de 50 A, conversor de corriente continua a alterna de 24 V AD a 220 V AC, dos tanques de 600 litros y de 1100 litros, bomba sumergible de corriente continua de 24 V y 300 W. Con el prototipo, se podrá realizar las mediciones con configuraciones distintas, es decir ensayos con baterías y con paneles solares directos y configuraciones de batería más el panel solar, permitiendo realizar investigaciones para instalar un sistema de bombeo de mayor capacidad.

PROBLEMA

PROBLEMA PRINCIPAL

¿En qué medida el prototipo del sistema de bombeo de agua con energía solar fotovoltaica permite evaluar los parámetros y variables que caracterizan al sistema?

PROBLEMAS SECUNDARIOS

¿De qué manera las características del panel influyen en el sistema de bombeo con energía solar?

¿De qué manera el tipo de bomba sumergible influye en el comportamiento del sistema de bombeo?

¿De qué manera el funcionamiento del prototipo permite comprender el funcionamiento del sistema de bombeo con energía solar fotovoltaica?

OBJETIVOS

Los objetivos del presente proyecto de investigación son:

OBJETIVO GENERAL:

Contar con una instalación que permita realizar mediciones de los parámetros en configuraciones distintas, evaluar y hacer mejoras en los diseños y disponer un medio técnico didáctico para su aprendizaje.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar los componentes del sistema de bombeo solar fotovoltaico en función del espacio disponible en el laboratorio de energías renovables, donde se ubicará el prototipo y que permita realizar las mediciones de los parámetros.

2. Caracterizar el prototipo mediante la evaluación de los parámetros y variables, en ensayos de bombeo sin baterías.
3. Caracterizar el prototipo mediante la evaluación de los parámetros y variables, en ensayos de bombeo con baterías.

MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

- Cámara fotográfica digital
- Computadora personal
- Memoria USB
- Estación meteorológica
- Generador fotovoltaico de 2 paneles de 270 W 24 V
- Regulador de carga de 40 A y de 12 a 24 V
- Sistema de baterías compuesto por dos baterías de 110 AH 12 V
- Motor-bomba, motor de corriente directa de 24 V 300 W
- Depósito de agua (donde irá sumergida la bomba y simulará el sondeo) de volumen de 1100 litros, altura de 1.40 m. y diámetro de 1.10 m.
- Sistema de tuberías
- Cuadro de conmutación (Bomba-Regulador)
- Accesorios para simular diferentes alturas manométricas y elementos de medición
- Bibliografía referida al uso de la energía solar fotovoltaica
- Guías, atlas, códigos
- Software PVsyst 7.0 para el cálculo de la irradiación solar de Ayacucho
- Pinza voltiamperimétrica
- Tanque de acumulación de agua de 600 litros, altura 1.12 m. y diámetro 0.97 m. Tipo de investigación empleada por la naturaleza de los objetivos y la metodología utilizada en la presente investigación es de tipo aplicada, con un nivel de investigación explicativa, método inductivo, observación, análisis, interpretación. Ubicación geográfica: El lugar de estudio de esta investigación tiene las siguientes coordenadas: latitud -13,15° S y longitud -74,23° W y está ubicada en los ambientes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Pampa del Arco perteneciente al distrito de Ayacucho, altitud 2805, figura 1:

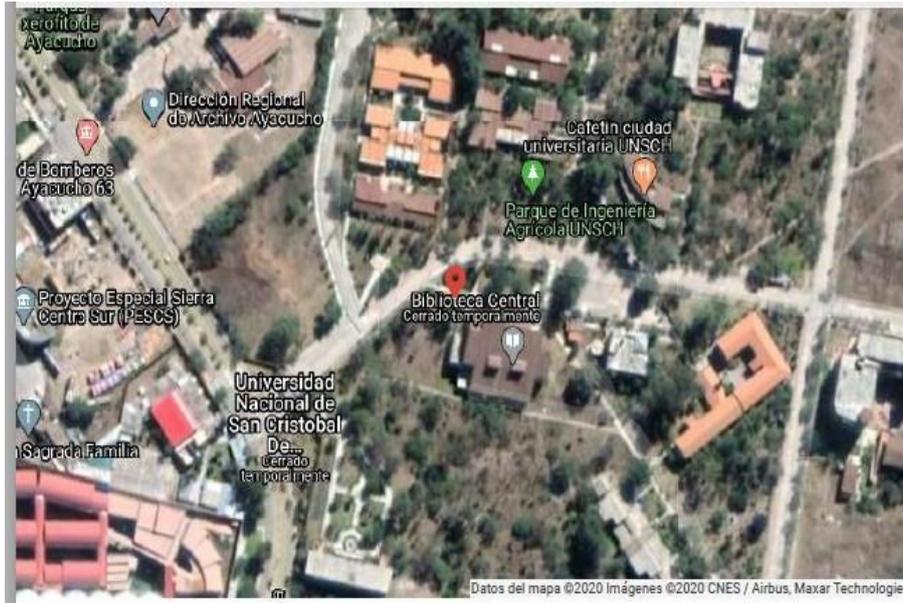


Figura 1: Ubicación geográfica, fuente <https://www.google.com/maps/place/Ayacucho>

MÉTODO

1. Determinación de la demanda energética
2. Determinación de la demanda hídrica
3. Determinación de la altura total equivalente

$$HTE = H_e + A_p + H_r + H_f$$

HTE altura total equivalente (m),

H_e Altura estática o geométrica (m),

A_p Altura por abatimiento del pozo (m), y

H_r Altura del reservorio (m), y

H_f Altura por pérdidas de fricción (m).

Según IDAE (2009) la altura de las pérdidas por fricción en las tuberías y otros accesorios del sistema hidráulico (válvulas, codos, etc.). Serán inferiores al 10 % de la energía hidráulica útil, por lo que la ecuación quedará expresada de la siguiente manera. (Dávalos, 2019)

$$HTE = 1,1 [H_e + A_p + H_r]$$

4. Cálculo de la energía hidráulica (E_H)

La energía hidráulica viene representada por la siguiente ecuación según IDAE (2009),

$$E_H = 2,725x HTE x Q$$

5. Cálculo de la potencia hidráulica (P_H)

E_H

$$P_H = \dots\dots\dots t$$

6. Cálculo de la potencia eléctrica de la motobomba (PMB)

Considerando el rendimiento máximo de $\eta_{MB} = 0,65$ para bombas superiores a 500 W se calculó con la siguiente ecuación, la potencia eléctrica de la motobomba.

$$PMB = \dots\dots\dots \eta_{MB}$$

7.- Cálculo de la energía necesaria para el dimensionamiento del generador (Epot. máx. diaria).

E_H

$$EMB = EPot.Max.Diaria = \dots\dots\dots \eta_{MB}$$

$EPot.Máx.Diaria$ energía potencial máxima (Wh/día),
 E_H energía hidráulica (Wh/día), η_{MB} eficiencia de la motobomba.

8.-Cálculo de la potencia del generador (P_g)

$$P_g = f. s \dots\dots\dots \frac{EPot.Max.diaria}{0,9 x HPS x KT}$$

P_g potencia del generador (W),

$EPot.Max.diaria$ Potencia máxima diaria (Wh/día),

HPS hora sol pico,

KT factor por utilizar inversor o inversor más baterías, y

$f. s$ factor de seguridad.

9.-Cálculo del caudal pico que debe soportar la bomba.

El rendimiento pico del subsistema motobomba tiene un valor de 65 % y se calcula con la ecuación (Dávalos, 2019)

$$Q_p = \frac{P_g x \eta_{MB}}{g x HTE}$$

Q_p caudal pico (l/s),

P_g potencia del generador (W), η_{MB}

rendimiento de la motobomba,

g gravedad (m/s²),

HTE altura total equivalente (m).

10.-Cálculo del número de paneles

Para el diseño del sistema se ha seleccionado paneles fotovoltaicos mono cristalino de 270 W, voltaje nominal 24 V, intensidad de operación 5,35 A, voltaje de operación 28,7 V, y corriente de corto circuito 5,72 A. Con la ecuación siguiente se calculará el número de paneles totales.

$$NP = \frac{P_g}{P_{pv}}$$

P_{pv}

NP es el número de paneles solares,

P_g es la potencia del generador y

P_{pfv} es la potencia pico del módulo fotovoltaico.

El número de paneles en paralelo se determina con la ecuación

$$NP_{serie} = \frac{Vn.sgen}{Vn.p}$$

$Np.serie$ es el número de paneles en serie,
 $Vn.sgen$ es el voltaje nominal de sistema de generación y
 $Vn.p$ es el voltaje nominal del panel.

El número de paneles en paralelo se determina con la ecuación

$$Np.paralelo = \dots\dots\dots NP$$

NP serie 11.- Cálculo de la sección del conductor eléctrico
 Para conductores de cobre la sección de los cables para corriente continua se calculará mediante la siguiente ecuación

$$S = \frac{2 \times L \times I}{\sigma \Delta V}$$

s es la sección del conductor en (mm²),
 L longitud en (m),

I intensidad en (A),
 σ conductividad del conductor (56 Ω.mm²/m),
 ΔV caída de tensión (4,8 V).

12.- Topología del sistema de bombeo fotovoltaico diseñado
 Con cada uno los componentes dimensionados, se configurará la topología del sistema de bombeo fotovoltaico, considerando almacenamiento de agua para 1 día de autonomía.

13.- Horas de sol pico (HSP) Es el promedio de horas de sol que se puede aprovechar en el transcurso del día, para generar la suficiente energía que pueda ser aprovechada por los paneles solares. La radiación promedio óptima que llega a la tierra es de 1000 w/m² y el número de horas de sol pico es equivalente a la insolación solar promedio diario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección de los componentes del sistema de bombeo
 El panel seleccionado cumple con las características técnicas de la tabla 1. Tabla 1. Características técnicas del panel solar fotovoltaico

MAGNITUD	VALOR/UNIDAD
POTENCIA MAXIMA (P _{MAX})	270 Wp
CORRIENTE DE POTENCIA MAXIMA (Imax)	8.78 A
TENSION DE MAXIMA POTENCIA (Vmax)	30.81 V
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO (Isc)	9.45 A
TENSION DE CIRCUITO ABIERTO (Voc)	38.12 V
EFICIENCIA	16.764 %

Número de paneles fotovoltaicos

El número de paneles de acuerdo a la demanda se muestra en la tabla 2 Tabla 2. Número de paneles fotovoltaicos

Consumo de energía WH/día	H:S:P panel W	Potencia del	N° de paneles en serie	N° de paneles en paralelo	N° paneles
1973	5.32	270	1	2	2

Potencia del sistema de bombeo del prototipo

La potencia del sistema de bombeo para las condiciones de operación de la bomba se muestra en la tabla 3

Tabla 3. Potencia requerida para bombeo fotovoltaico

Altura m udal m3/s	tencia	bomba tencia	motor tencia	tencia juerida W
3.5 01	.33			60

La potencia que se requiere para el funcionamiento de la instalación del prototipo para bombeo es de 60 W cuya potencia es menor a los 270 W de un panel.



Figura 2 Prototipo construido

Pruebas realizadas al prototipo

Pruebas realizadas permiten determinar el desempeño del prototipo en función de cuatro variables: Caudal de agua (m³/s), Potencia de la bomba (watts), tensión (V) y la irradiación solar (W/m²)

Los parámetros de validación más importantes son:

La curva potencia - caudal

La curva altura manométrica – caudal

La curva irradiación solar – potencia en bomba La curva Irradiación solar – caudal.

Ensayo del prototipo con baterías

Se realizaron las mediciones para obtener las curvas de potencia-altura y altura manométrica-caudal, para simular la altura manométrica se realizó mediante una válvula y la bomba recibió una tensión de 24 voltios mediante al banco de baterías figura 9, las mediciones se realizaron con la pinza voltiamperimétrica, la potencia es el producto del Voltaje y corriente.



Figura 3 banco de baterías

En la figura 3 se muestra el prototipo instalado para las pruebas realizadas con batería de 12 V cada una y 110 Ah, el regulador de carga para los 24 voltios y el inversor de 24 V CD a 220 V AC.

Mediciones realizadas a la salida del regulador de carga en corriente continua Voltaje

de salida del panel : 25.7 V.

Corriente : 10.4 A.

Potencia : 267.28 W.

Mediciones realizadas a la salida del inversor en corriente alterna Voltaje

de entrada al inversor : 25.7 V. DC

Voltaje de salida del inversor : 222 V. AC

Corriente a la salida del inversor : 0.34 A.

Potencia de salida del inversor : 75.48 W

Potencia instalada de la lámpara : 25.00 W.

Las condiciones estándar:

Irradiancia : 1000 W/m²

Temperatura de célula : 25 °C

Comportamiento del sistema de bombeo solar fotovoltaico con banco de baterías

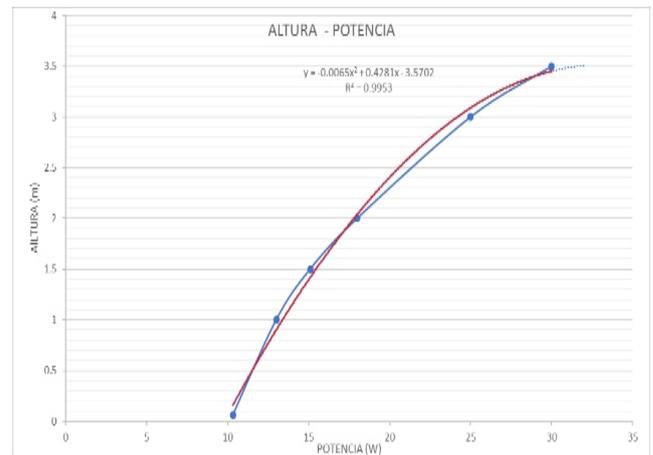


Figura 4 Altura para un caudal máximo de 15 l/m

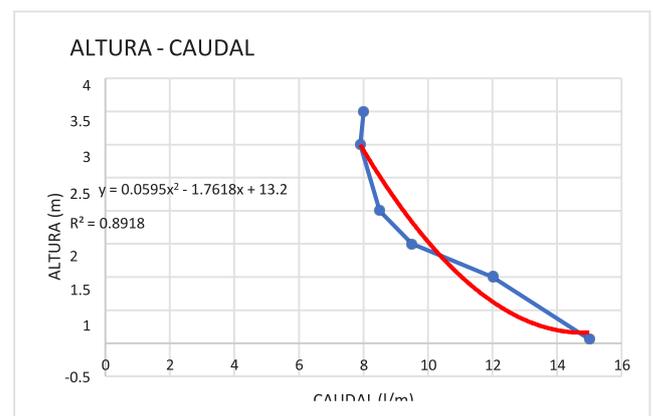


Figura 5 Evolución de la potencia demanda para el caudal en función de la altura En la figura 4 se observa que a mayor altura la bomba requiere más potencia y en la figura 5 el caudal disminuye con la altura.

Con respecto a los valores de corriente y voltaje se puede decir que a mayor altura el voltaje disminuye por la caída de tensión, aumentando la corriente Tabla 4.

Tabla 4 Resultados de las mediciones de voltaje y corriente

Medidas	Altura manométrica (m)	Voltaje V	Intensidad A	Potencia (W)	Caudal lit/min
1	0.06	25.8	0.4	10.32	15
2	1	24.2	0.54	13.068	12
3	1.5	23.3	0.65	15.145	9.5
4	2	22.9	0.79	18.091	8.5
5	3	21.8	1.15	25.07	7.9
6	3.5	20.3	1.48	30.044	8

Ensayo del prototipo sin baterías

El ensayo bombeo directo se ha realizado con valores de irradiancia solar, tabla 5 Tabla 5 Irradiancia solar registradas el 09 de febrero del 2020

Hora	Irradiación W/m2
10: 00 a.m	960
11: 00 a.m	1150
11:30 a.m	1160
12:00 a.m	1100
01:00 p.m	1000
02:00 p.m	980

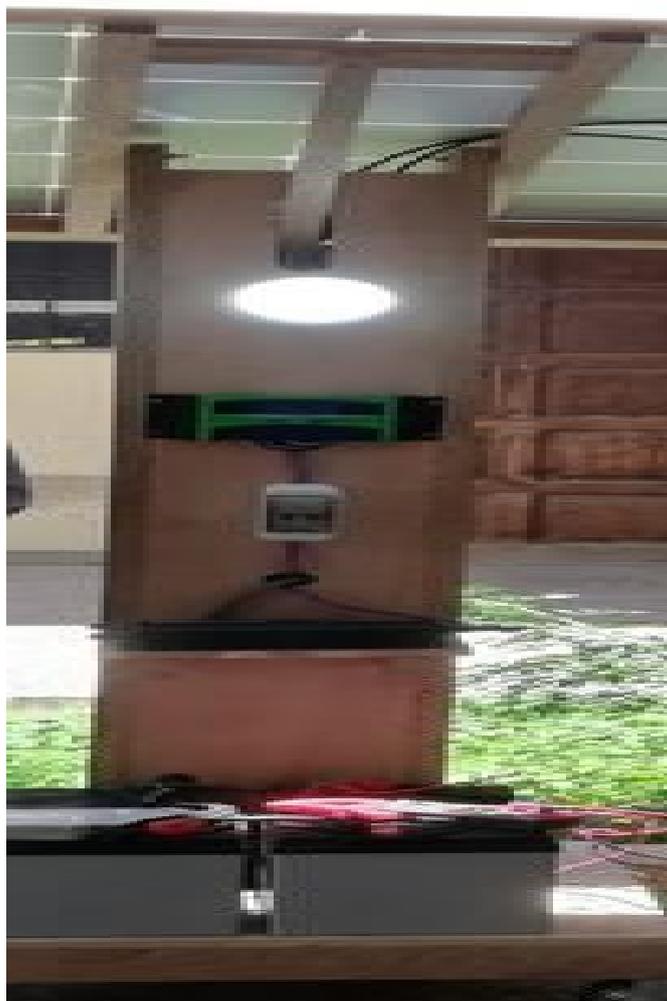


Figura 6 Panel solar con irradiación directa

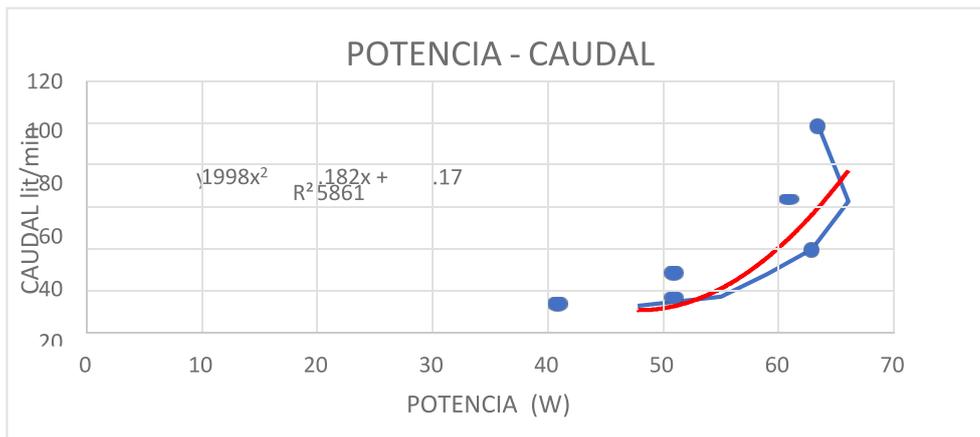


Figura 7 Curva de potencia entregada por el sistema y el caudal bombeado

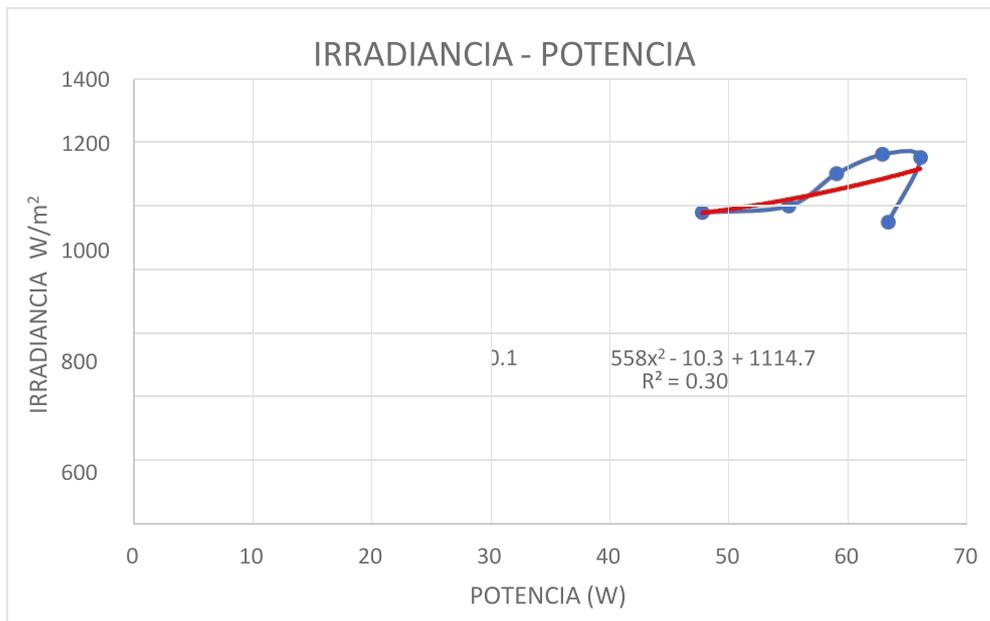


Figura 8 curva irradiancia solar y la potencia entregada por el sistema.

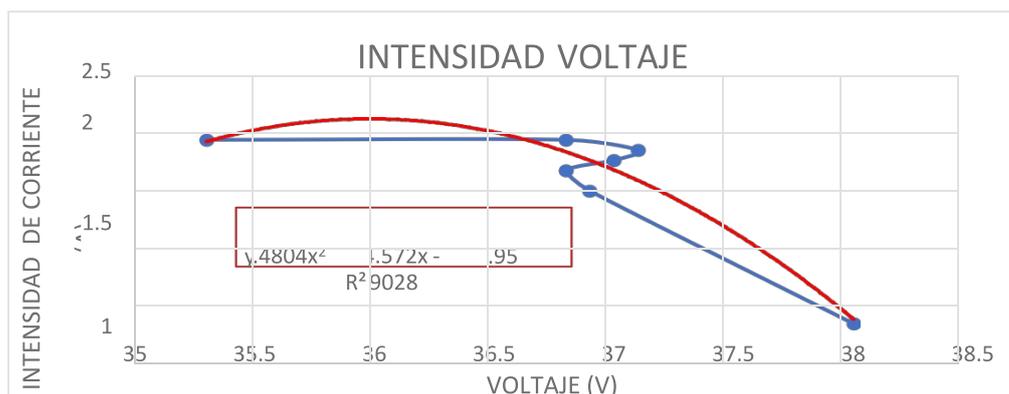


Figura 9 curva intensidad de corriente voltaje

En la figura 7 y 8 se observa que a mayor irradiancia solar la potencia entregada por el sistema y el caudal obtenido aumentan.

En la figura 9 se observa que el valor de la intensidad de corriente aumenta con la intensidad de radiación solar,

mientras que la tensión disminuye conforme aumenta la temperatura alcanzada en las células del módulo. La superficie del módulo se calienta por la radiación solar que recibe incrementando su temperatura.

DISCUSIÓN

Las pruebas se han realizado con ángulo de inclinación de los paneles de 12.77° , que se determinó teniendo en cuenta la latitud de -13.15° , el prototipo construido permite variar el ángulo de inclinación desde una posición horizontal 0° hasta 30° .

El regulador e inversor instalado son unidades independientes sin embargo de acuerdo a la investigación realizada también viene en una sola unidad que forman un inversor híbrido, los recomendados son del tipo PMMT que permiten trabajar a mayor nivel de tensión.

Al realizar las mediciones de la corriente y el voltaje en el sistema de bombeo directo sin baterías, se comprueba que la potencia depende de la irradiación incidente en el panel, a una irradiación de 1150 W/m^2 la potencia en el motor es de 66.24 W , y a 980 W/m^2 la potencia es de 47.67 W lo cual podemos decir que la potencia que suministra el panel en horas de mayor irradiación solar permite bombear un caudal de 62.49 l/min . Estudio realizado (Arija, 2010) obtiene curvas similares, lo que permite definir que las horas de funcionamiento óptimas serían de las 11 a 13 horas.

En la prueba con baterías se observa que al aumentar la altura manométrica de 0 a

3.5 mts . se presenta una caída de tensión de 5.5 V y la corriente aumenta de 0.4 a

1.48 A sin embargo se obtiene mayor potencia de salida en la bomba y una reducción del caudal de 15 l/min a 8 l/min , lo que demuestra que a mayor altura el requerimiento de la potencia aumenta. Estudio realizado (Arija, 2010) obtiene curvas de similar tendencia.

El tipo de panel solar escogido es monocristalino teniendo en cuenta la eficiencia del panel y la zona de estudio que tienen un clima frío con tendencia a tormentas en comparación con los policristalinos que se recomienda para climas cálidos (Autosolar, 2017) con respecto al costo también hay diferencia el policristalino es de menor costo que el monocristalino.

CONCLUSIONES

El prototipo instalado en el Laboratorio de Termodinámica y Máquinas Eléctricas, se muestra como una herramienta didáctica confiable y práctica para determinar el comportamiento del sistema de bombeo con energía solar fotovoltaica. Con la finalidad de caracterizar las curvas del prototipo, se utilizó una pinza voltiamperimétrica de escala hasta 600 V y 400 A . AD/AC que permitieron determinar los parámetros eléctricos del generador fotovoltaico.

Se monitoreó el sistema instalado sin batería con bombeo directo (panel solar) y con baterías, con la bomba accionada con motor de corriente continua de 24 V y 300 W , que permitió la caracterización del sistema y el comportamiento del conjunto motor- bomba obteniéndose información esperada de acuerdo al marco teórico y a las características técnicas de los equipos.

Para la captura de datos de la radiación se utilizó la estación meteorológica cuyos datos se obtuvieron de un solo día, sin embargo se tiene información indirecta (NASA) de la irradiación solar durante el año 2020, con esta información se ha determinado el número de paneles y se han realizado las curvas características con variaciones de caudal, altura, potencia e irradiación, hay que precisar que no se tiene una base de datos de la irradiación solar al no contar con los

equipos adecuados.

En relación a la hipótesis de esta investigación podemos decir que se ha cumplido, pues los resultados de las pruebas han brindado los datos que permiten asegurar el funcionamiento del prototipo con corriente alterna al hacer funcionar la lámpara de 50 W de forma directa con un Voltaje de 220 V AC . y con corriente continua motor- bomba con un voltaje de 24 VDC .

En los sistemas de bombeo fotovoltaico el caudal de agua y la potencia de la bomba, es directamente proporcional a la irradiación solar incidente en el plano del generador fotovoltaico e inversamente proporcional a la altura manométrica.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se ha realizado gracias al apoyo económico que la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga da al investigador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arija, G.D (2010) *Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas*. Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior Departamento de Ingeniería Eléctrica. Disponible <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10871/proyecto.pdf>. Consultado el 20 de agosto del 2020.
- Asmat, C.P. (2018) *Determinación de la eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico en el distrito de Yaurisque – Cusco*, Tesis pre grado, UNALM Perú disponible en <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM>, consultado el 30 de marzo del 2020.
- Autosolar (2017) *Diferencia entre silicio monocristalino y multicristalino o policristalino*, disponible en <https://autosolar.es/blog/placas-fotovoltaicas>, consultado el 16 de mayo de 2020.
- Dávalos, P.J (2019) *Diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el caserío la Guayaba, distrito de Bellavista, Jaén-Cajamarca*, Tesis de pregrado, disponible <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/100>, consultada el 06 de julio del 2020.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). (2009) *Instalaciones de energía solar fotovoltaica. Pliego de condiciones técnicas de instalaciones aisladas a la red. España*. Recuperado a partir de www.idae.es, consultado el 16 de julio del 2020
- Rochin, G. J., Ortiz, G.S y Ellis, S. A (s.f) *Energía solar para bombeo de agua experiencias con ranchos sustentables en Baja California Sur. Firco y Swtdi.* disponible www.bionica.info>Rochin-Solar Bombeo, consultado el 15 de marzo de 2020.