

# Photovoltaic Solar Powered Pumping System for Agriculture in Remote Places

Pol Ardiles-Morales, B. Sc<sup>1</sup>, Eliseo Zarate-Perez, Ph. D Student<sup>1</sup>, Cecilia Cornejo-Carbajal, M. Sc<sup>1</sup>.  
<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), 15314 Los Olivos, Perú, N00047654@upn.pe, eliseo.zarate@upn.edu.pe, cecilia.cornejo@upn.edu.pe

*Abstract– Photovoltaic solar energy is one of the renewable, clean, and inexhaustible sources of energy. It is applied considering the basic needs for its operation in rural areas, where the supply of electricity is limited, as well as water. The main objective is to analyze the performance of a photovoltaic solar energy pumping system. The results show that it is feasible to opt for a pumping system using this type of energy, based on its constant and high performance throughout the year. Therefore, these types of systems are recommended for family farming applications.*

*Keywords– Pumping system, photovoltaic energy, applications in agriculture.*

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.303>

**ISBN:** 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

# Sistema de Bombeo con Energía Solar Fotovoltaica para la Agricultura en Lugares Remotos

Pol Ardiles-Morales, B. Sc<sup>1</sup>, Eliseo Zarate-Perez, Ph. D Student<sup>1</sup>, Cecilia Cornejo-Carbajal, M. Sc<sup>1</sup>.  
<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), 15314 Los Olivos, Perú, N00047654@upn.pe, eliseo.zarate@upn.edu.pe, cecilia.cornejo@upn.edu.pe

**Resumen**– La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes de energía renovables, limpias e inagotables. Ella se aplica considerando las necesidades básicas para su funcionamiento en zonas rurales, donde el suministro de energía eléctrica es limitado, así como el agua. El objetivo principal es analizar el desempeño de un sistema de bombeo con energía solar fotovoltaica. Los resultados muestran que es viable optar por un sistema de bombeo utilizando ese tipo de energía, basándose en su constante y alto desempeño durante todo el año. Por lo tanto, se recomienda estos tipos de sistemas en aplicaciones de agricultura familiar.

**Palabras clave**– Sistema de bombeo, energía fotovoltaica, aplicaciones en agricultura.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los efectos de la pandemia de COVID-19 en la agricultura familiar se presentan desde tres perspectivas: a) las dificultades para continuar con su dinámica productiva y comercial, b) los volúmenes producidos, y c) los precios e ingresos[1]. El sector agrícola tiene una baja inclusión a la red energética nacional en áreas con irrigación en países en desarrollo, donde en los lugares apartados necesitan acceso a la red eléctrica convencional. Así, debido a la baja tasa de acceso de la población a la energía, existe la necesidad de procesar energía confiable y renovable para usos agrícolas y domésticos. Por ello, los PVWPSI (sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua para riego) se han utilizado, comúnmente, en muchos países para aumentar el acceso a los recursos de riego [2].

A pesar del continuo desarrollo, los actuales sistemas de generación de energía renovable aún no son confiables ni adecuados para satisfacer la demanda global de energía limpia. Los desafíos y problemas, como la integración de la red, la calidad de la energía, el costo, las fallas de la planta siguen siendo motivo de preocupación[3]. Se tiene poca esperanza de acceso a la electricidad en muchas de estas áreas remotas y rurales. Por la instalación de nuevas subestaciones eléctricas y líneas de transmisión no es económicamente factible debido a las limitaciones geográficas en estas localidades.

Por ello, los sistemas de generación de energía fuera de la red son una de las opciones importantes para electrificar estas áreas. Pero en lugar de sistemas convencionales como los de energía impulsados por motores diesel, la instalación de un pequeño sistema de generación de energía renovable (ER) fuera de la red puede ser una aplicación interesante [4]. De ese modo, los PVWPSI se basan en la conversión de energía solar en energía eléctrica mediante módulos fotovoltaicos para alimentar una bomba de agua para riego. Dado que la radiación solar no siempre es suficiente para abastecer la demanda diaria de energía

eléctrica para riego, los tanques de almacenamiento de agua o el banco de baterías se consideran en el PVWPSI de acuerdo con las especificaciones condiciones de cada sistema y ubicación [5].

Los sistemas de almacenamientos de energía son una de las pocas respuestas a la integración con producción de energía variable debido a la fluctuación de sus recursos [6]. El sistema de almacenamiento puede disminuir los efectos de la potencia de salida variable de las fuentes de energía renovable y garantizar que la energía se pueda enviar de manera confiable en respuesta a los requisitos de carga [7]. Si la energía fotovoltaica produce electricidad cuando existe la luz del sol, los sistemas fotovoltaicos independientes necesitan un sistema de almacenamiento de energía de respaldo que la haga disponible durante el mal tiempo o las condiciones nocturnas. Los sistemas fotovoltaicos independientes, usan medios de almacenamiento como las baterías; por ejemplo, las de plomo-ácido se usa más comúnmente con sistemas fotovoltaicos independientes por estar ampliamente disponibles [8].

El bombeo fotovoltaico se ha convertido en uno de los campos más favorables en las aplicaciones para un sistema independiente, existen principalmente dos tipos de bombas: centrífugas y desplazamiento positivo. En la centrífuga, la rotación de un impulsor sumerge el agua hacia la tubería. La velocidad y la presión del agua dependen de la potencia mecánica disponible en el impulsor giratorio y la cabeza total. En consecuencia, la bomba de desplazamiento usa un pistón o un tornillo para controlar el flujo de agua que pueden ser accionadas por tipos de sistemas de accionamiento. Los más populares son los motores de corriente continua (CC), los motores de corriente alternativa (CA) o los motores BLDC [9].

El presente trabajo se ajusta a la problemática existente del aprovechamiento de agua en los campos agrícolas donde los pueblos rurales cuentan con energía eléctrica limitada. El objetivo principal es analizar un sistema de bombeo con energía fotovoltaica. Ellos se realiza (i) recolectando datos meteorológicos para modelar el sistema FV. Seguidamente (ii) analizando el funcionamiento energético y fluido mediante la simulación del software PVsyst.

## II. METODOLOGÍA

### A. Toma de datos referencial para sistema FV

Se realizó una toma de datos ubicado en el departamento de Huaraz distrito de Recuay, en la comunidad de Ranra Ucuro, con latitud: -9,7222 y longitud: -77,4563 reunidos en la fuente MTEONORM, NREL y SENAMHI [10][11][12], las que

permitieron el desarrollo de los cálculos de la estructura del sistema. Se obtuvo el potencial solar FV, siendo este recurso estrictamente unido a condiciones climatológicas. Se dispuso el dato de irradiación solar obteniendo el rango de 2020.

### B. Uso de software PVsystem

Es una herramienta que simula y analiza datos de los sistemas fotovoltaicos, permite dimensionar el tamaño de las instalaciones considerando la radiación solar que recibiría en función de su ubicación ingresando una base de datos meteorológica, se tiene en cuenta la proyección de sombras por el movimiento del sol durante el día. Abarca dos variantes específicas de instalaciones, bombeo y conectado CC, además de los dos tipos principales conectado a red y aislado. Incluye gran cantidad de opciones y permite modificar e incluir todos los datos necesarios para un estudio en detalle [13].

### C. Modelo de módulo fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos disponibles en el mercado, por lo general, se combinan como una matriz (ya sea en serie o conexión en paralelo) para satisfacer diferentes demandas de energía. El tamaño seleccionado para el sistema propuesto es un módulo de 450 W [14]. El módulo seleccionado es el módulo fotovoltaico monocristalino EGE-450W de 450 W. Como se muestra en Figura 2, el modelo del módulo fotovoltaico se puede representar, según el circuito equivalente en la Figura 1 [15]. Es decir, se usa como fuente de corriente en paralelo con un diodo.

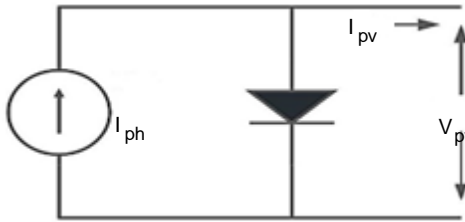


Fig. 1 Circuito equivalente simplificado de una celda PV.

Las características eléctricas de la celda fotovoltaica no son lineales y varían según la radiación solar (G) y la temperatura de la celda (T). La corriente de salida fotovoltaica  $I_{pv}$  se puede enunciar mediante la Ecuación 1 [15].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\left( \frac{q \cdot V_{pv}}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde  $I_{pv}$  la corriente de salida de la celda fotovoltaica,  $I_{ph}$  la corriente fotogenerada,  $I_0$  es la corriente de saturación en la oscuridad,  $q$  es la carga del electrón =  $1.6 \times 10^{-19}$  (C),  $V_{pv}$  el voltaje de salida de la celda fotovoltaica,  $n$  es el factor de idealidad del diodo, la constante de K es Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-19} \left( \frac{J}{K} \right)$ , T es la temperatura de la celda (°C). La corriente de salida del módulo fotovoltaico de un número de celdas conectadas en serie ( $N_s$ ) y el número de celdas

conectadas en paralelo ( $N_p$ ) se puede establecer mediante la Ecuación 2 [15].

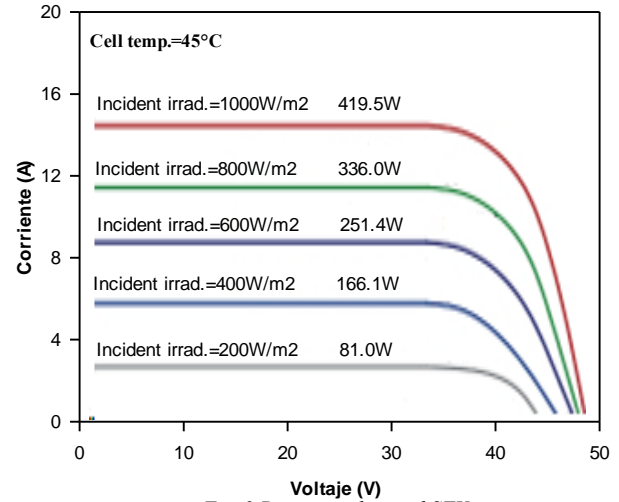


Fig. 2 Diagrama de panel SFV

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left( e^{\left( \frac{q \cdot V_{pv}}{N_s \cdot n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (2)$$

### D. Modelo de baterías

En los sistemas fotovoltaicos las baterías recargables comerciales del mercado son las de plomo-ácido o (Pb-S), las de níquel-cadmio o (NiCad), las de níquel-hidruro metálico o (NiMH), los tipos de iones de litio o (Li-ion). Las baterías de plomo-ácido son las más populares y ampliamente utilizadas en los sistemas de energía renovable. El circuito equivalente de un modelo dinámico de batería general parametrizado para caracterizar los tipos más populares de baterías recargables. Este modelo se puede representar mediante una fuente de voltaje controlada simple en serie con una resistencia constante, como se muestra en la Figura 3 [15], y se describe mediante las Ecuación 3 y 4 [15].

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q \int i dt} + A \exp(-B \int i dt) \quad (3)$$

donde, E es el voltaje sin carga (V),  $E_0$  es el voltaje constante de la batería = 12 V, K es el voltaje de polarización (V), Q es la capacidad de la batería (Ah),  $\int i dt$  es la carga real de la batería (Ah), A es la amplitud de la zona exponencial (V), B es la constante de tiempo inversa de la zona exponencial (Ah)<sup>-1</sup>. Por lo tanto,  $V_{bat}$  (ecuación 4) es el voltaje de la batería (V), R es la resistencia interna (ohmios), i es la corriente de la batería (A).

$$V_{bat} = E - i \times R \quad (4)$$

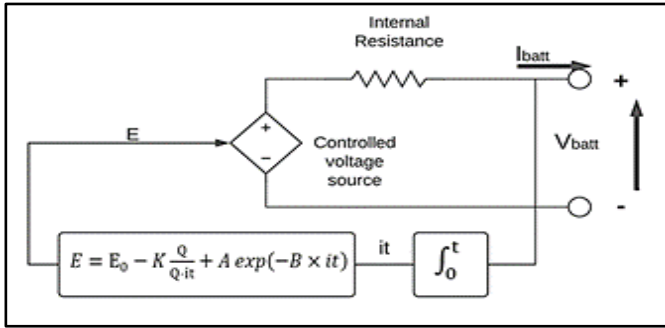


Fig. 3 Modelo general de batería.

### III. RESULTADOS

#### A. Toma de datos

Para la recolección de estos datos se definió la ubicación mediante coordenadas para obtener datos mostrados en la Fig. 5 y tabla 1 [11] como la irradiación, temperatura entre otros puntos necesarios para la estimación y simulación con ayuda del software PVsyst del sistema fotovoltaico. La Tabla I presenta los resultados del desempeño de energía solar fotovoltaica evaluado para todos los meses. Los meses de mayor desempeño para este lugar son julio y agosto. Aunque, para los meses restantes el desempeño se mantiene con valores óptimos y constantes.

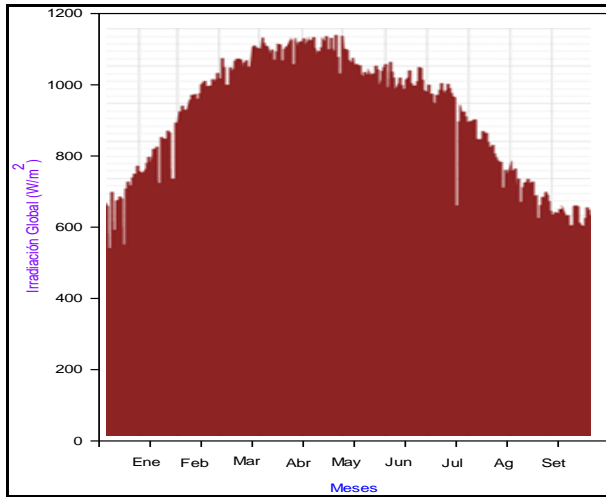


Figura 4 Registro de irradiación por meses en el distrito de Recuay

TABLA I  
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL DISTRITO DE RECUAY

Mes	Radiación solar kWh/m <sup>2</sup> / día	Energía en kWh
Enero	5,40	538
Febrero	5,44	483

Marzo	5,47	534
Abril	6,09	566
Mayo	6,39	606
Junio	6,75	618
Julio	7,02	673
Agosto	7,12	669
Setiembre	6,33	576
Octubre	5,74	552
Noviembre	5,52	510
Diciembre	5,01	493
Anual	6,02	6,818

#### B. Características del sistema FV

El sistema fotovoltaico que será capaz de suministrar la energía suficiente se presenta en la tabla II. Se toma en consideración los datos de un panel comercial [14].

TABLA II  
DATOS TÉCNICOS DE PANEL PV

Especificaciones	Parámetros
Tipo de modulo PV	Monocrystalino
Potencia de salida (Pmáx)	450W
Corriente Cortocircuito (Isc)	11.57 A
Tensión de circuito abierto (Voc)	49.28 V
Corriente máxima (Imp)	10.99 A
Tensión máxima (Vmp)	40.96 V
Tolerancia de potencia	0-+5W

#### C. Características de la bomba

TABLA III  
DATOS TÉCNICOS DE LA BOMBA

Especificaciones	Parámetros
Instalación	Monofásica AC
Modelo	PKm 100
Presión	10 bar
Q (m <sup>3</sup> /h)	0.3
Q (l/min)	5
Tensión	220 V
Corriente	9 A
Diámetro de entrada	¾
Diámetro de salida	¾
Condensador	31,5uF – 450 VL

Se tomo la ficha técnica de la bomba marca *Pedrollo* mostrado en la tabla 3 [17]. Así se estima el desempeño del sistema fotovoltaico aislado. De la misma forma, se consideró en las especificaciones el tipo de instalación tanto como la tensión y corriente, presión, caudal y diámetros de entrada y salida [16].

#### D. Simulación de del sistema fotovoltaico mediante el software PVsyst

Para estimar y simular el desempeño del sistema aislado fotovoltaico, se consideró la carga de la bomba. Estos datos se utilizan para seleccionar el controlador y la batería, según como se muestra en la Figura 8. La Figura 5 muestra la producción del sistema fotovoltaico para atender la carga de la bomba. Los datos se relacionan estrechamente con los mostrados en la Tabla I.

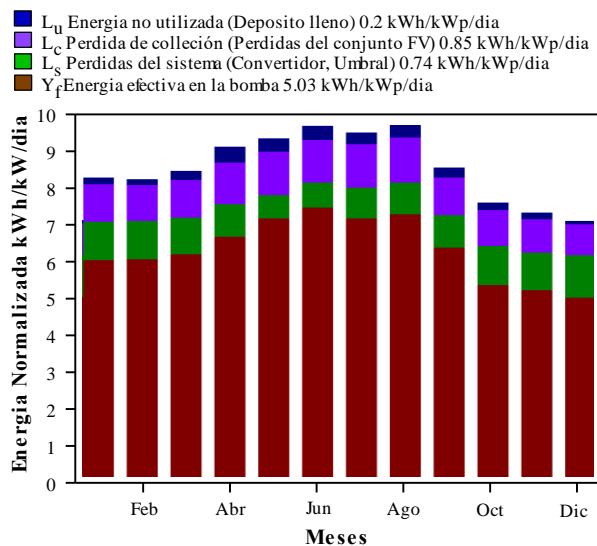


Figura 5 Producción de energía PV

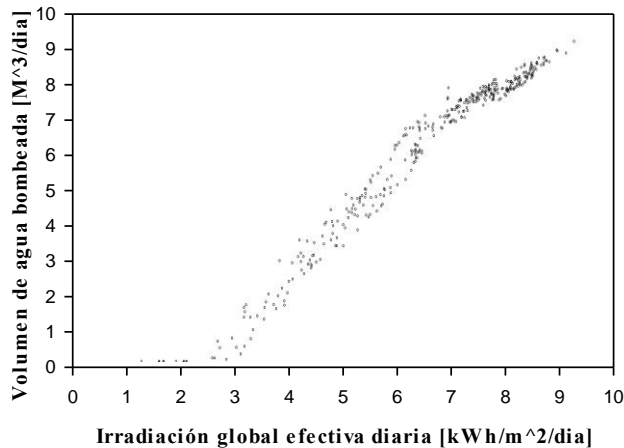


Figura 6 Producción diaria de agua e irradiación

La Figura 5 muestra la energía que es aprovechada por el sistema, así como la energía no utilizada. Asimismo, se puede apreciar la pérdida de colección y pérdida del sistema. En la Figura 6 se estima la producción efectiva diaria de energía solar fotovoltaica, respecto al bombeo de agua. La figura muestra la relación estrecha entre la producción que se genera y el volumen de agua bombeado. Por último, la Figura 7 muestra el caudal promedio de la bomba y la energía solar disponible para ser usado por la bomba.

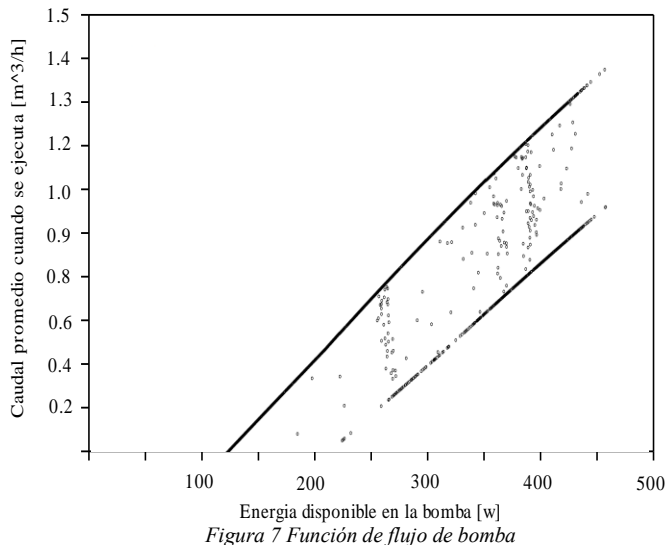


Figura 7 Función de flujo de bomba

#### E. Estimación del comportamiento del agua en el sistema

Se realizó el cálculo la velocidad, el número de Reynolds, el factor de fricción, las pérdidas de carga por tramos y fricción. La diferencia de presiones por elevación de tuberías y accesorios. Para los cálculos, se ingresaron los datos al software y se muestran en la Figura 9. El caudal fue proporcionado por su ficha técnica de la electrobomba, así, se trabajó con la densidad del agua, la longitud estimada de bombeo y un diámetro interior establecido. En la Figura 10, se exponen los datos relacionados con la pérdida de carga en el diámetro interior. Los resultados muestran que, a mayor diámetro, mayor es la pérdida de carga.

**Datos Iniciales**

Caudal:  m<sup>3</sup>/h

Base de datos de líquidos

Densidad:  kg/m<sup>3</sup>

Viscosidad Dinámica:  Pa·s

Calcular a partir de Viscosidad Cinemática

Diámetro Interior:  mm

---

Velocidad:  m/s

Número de Reynolds:  Zona de transición

Ver tabla de rugosidades

Rugosidad  mm

Factor de Fricción

---

**Pérdida de carga en tramos rectos**

Pérdida de carga por metro:

m

mbar / m

Longitud Tubería  m

Pérdida de carga total en tramos rectos:

m

Pérdida de carga (l)  mbar

Figura 8 Cálculo de flujo en el sistema

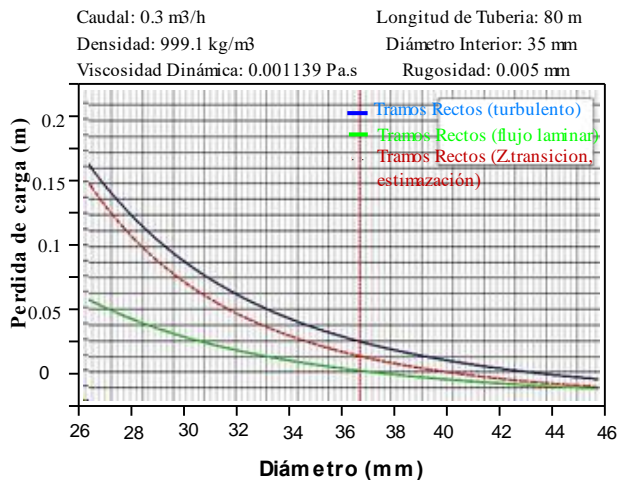


Figura 9 Gráfico de pérdida de carga - diámetro interior

#### F. Costo en implementación del sistema de bombeo

En la siguiente tabla se muestra los componentes necesarios para la implementación del sistema de bombeo.

TABLA IV  
LISTA DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE BOMBEO

Concepto	Cantidad	Precio total
Bomba periférica PKm 100	1	S/ 1774
Válvula de globo	1	S/ 12
Tubo PVC ¾"	3	S/ 51
Unión universal	1	S/ 6
Codo 90°	1	S/ 3
Válvula de pie	1	S/ 37
Pegamento de PVC	1	S/ 30
Soporte para bomba	1	S/ 300
Cinta de goteo & accesorios	1	S/ 900

#### G. Costo en implementación de energía fotovoltaica

En la siguiente tabla se muestra los siguientes materiales y componentes a usarse para la implementación del sistema solar fotovoltaico.

TABLA V  
LISTA DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Concepto	Cantidad	Precio total
Panel solar 450W 24V Monocristalino	3	S/ 2500
Controlador PWM LCD 20A 12/24V	1	S/ 110
Bateria AGM 12V 35A	2	S/ 500
Inversor Victron Phoenix 24 500 VA	1	S/ 750
Accesorio de conexión y cableado	1	S/ 320
Llave termomagnética	1	S/ 25
Soporte de metálico para paneles	1	S/ 400

Los cálculos analizados mediante la simulación muestran al sistema de bombeo con energía fotovoltaica usando el software PVsyst. Así se visualizó el desempeño de los datos geográficamente ubicados y las variables del sistema proyectando el resultado del desempeño y la viabilidad.

Junto a [18] la implementación de esta clase de sistemas es beneficioso, ya que se hace uso de energía renovable como la energía solar haciéndola eficiente y eficaz favoreciendo al ahorro en su implementación y recuperación de la inversión económica. Según [19] este tipo de proyectos ayuda a una mejora satisfactoria en la producción, consiguiendo así un mejor control en el riego.

#### IV. CONCLUSIONES

Se tomó correctamente los datos obtenidos de NREL, SENAMHI y METEONORM, lo que permitió la elaboración de la Figura 4 y el diagrama de barras delimitando la irradiación obtenida en meses durante el año 2020. Por otro lado, en la Tabla I se muestra datos en meses de producción, en base a la radiación solar.

El análisis del funcionamiento energético y fluido del sistema mediante el software PVsyst graficó la producción de energía; tanto como las pérdidas obtenidas, como se muestra en la Figura 5. Los resultados muestran que el sistema es eficiente, porque presenta una pérdida mínima de energía.

Así mismo, mediante la Figura 6 se demuestra que la producción de caudal del fluido con referencia a la irradiación tiene un comportamiento lineal. Igualmente, la Figura 7 muestra la linealidad del caudal promedio generado con la disponibilidad de energía producida. Por último, en la Figura 8 se estima la pérdida por fricción y carga; que a mayor diámetro mayor pérdida en tramos largos.

#### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo en parte de la Universidad Privada del Norte (UPN).

#### REFERENCIAS

[1] J. M. Bermúdez, E. Ruisánchez, A. Arenillas, A. H. Moreno, and J. A. Menéndez, "New concept for energy storage: Microwave-induced carbon

- gasification with CO<sub>2</sub>,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 559–564, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2013.11.021.
- [2] H. Mhamdi, O. Kerrou, M. Ahticha, A. Frimane, M. Bakraoui, and M. Aggour, “Mathematical model design of photovoltaic pumping water systems for irrigation,” *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, vol. 25, no. 4, pp. 591–608, 2021.
- [3] L. Gottschamer and Q. Zhang, “Interactions of factors impacting implementation and sustainability of renewable energy sourced electricity,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 164–174, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.06.017.
- [4] B. S. Pali and S. Vadhera, “A novel solar photovoltaic system with pumped-water storage for continuous power at constant voltage,” *Energy Conversion and Management*, vol. 181, pp. 133–142, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.004.
- [5] R. J. Chilundo, G. A. Maúre, and U. S. Mahanjane, “Dynamic mathematical model design of photovoltaic water pumping systems for horticultural crops irrigation: A guide to electrical energy potential assessment for increase access to electrical energy,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 238, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117878.
- [6] Z. Yang, Z. Chen, L. Guo, Y. Chen, X. Huang, and Y. Wang, “Design techniques of distributed photovoltaic/energy storage system,” 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017, Oct. 2017, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056360.
- [7] T. U. Daim, X. Li, J. Kim, and S. Simms, “Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity: Quantifying expert opinions,” *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 3, pp. 29–49, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.EIST.2012.04.003.
- [8] B. A. Mubdir and R. A. Fayadh, “Smart charger for sealed lead acid batteries based on parallel port PC interfacing,” in *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, Nov. 2010, pp. 119–124. doi: 10.1109/PECON.2010.5697568.
- [9] E. E. A. Zahab, A. M. Zaki, and M. M. El-sotouhy, “Design and control of a standalone PV water pumping system,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 322–337, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jesit.2016.03.003.
- [10] “Solar Forecasting & Solar Irradiance Data.” <https://solcast.com/> (accessed Feb. 13, 2022).
- [11] ENERGY-RNREL, “National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page | NREL.” <https://www.nrel.gov/> (accessed Feb. 13, 2022).
- [12] “SENAMHI - Perú.” <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico> (accessed Feb. 13, 2022).
- [13] A. Soualmia and R. Chenni, “Modeling and simulation of 15MW grid-connected photovoltaic system using PVsyst software,” *Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016*, pp. 702–705, Jul. 2017, doi: 10.1109/IRSEC.2016.7984069.
- [14] “Helios Plus.” <https://autosolar.pe/pdf/HELIOS-PLUS-425-450M.pdf>
- [15] C. Pica, R. Munteanu, S. Pavel, and H. Beleiu, “Modeling of Photovoltaic Panels,” *EPE 2018 - Proceedings of the 2018 10th International Conference and Expositions on Electrical and Power Engineering*, pp. 769–773, Dec. 2018, doi: 10.1109/ICEPE.2018.8559884.
- [16] I. Yahyaoui, A. Atieh, A. Serna, and F. Tadeo, “Sensitivity analysis for photovoltaic water pumping systems: Energetic and economic studies,” *Energy Conversion and Management*, vol. 135, pp. 402–415, 2017, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.12.096.
- [17] “Electrobomba Pedrollo.” <https://bombaspedrollo.net/producto/bomba-periferica-pk/>
- [18] V. S. Korpale, D. H. Kokate, and S. P. Deshmukh, “Performance Assessment of Solar Agricultural Water Pumping System,” *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 518–524, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2016.11.219.
- [19] M. A. Jones, I. Odeh, M. Haddad, A. H. Mohammad, and J. C. Quinn, “Economic analysis of photovoltaic (PV) powered water pumping and desalination without energy storage for agriculture,” *Desalination*, vol. 387, pp. 35–45, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.DESAL.2016.02.035.