

Energía solar fotovoltaica para la explotación de agua subterránea**Photovoltaic solar energy for the exploitation of underground water****FARFÁN NEYRA, José Luis¹; CAMPOS UGAZ, Walter Antonio²**^{1,2} Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo**RESUMEN**

El objetivo de la presente investigación radica en el uso de la energía solar fotovoltaica en la explotación de aguas subterráneas para fines agrícolas en la Cuenca Motupe- Olmos-La Leche, como mejor alternativa con respecto al método tradicional del bombeo de agua utilizando grupos electrógenos o energía eléctrica. La zona de estudio, según el Mapa Solar del Perú elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en convenio con el Ministerio de Energía y Minas (MEM) cuenta con una alta disponibilidad de radiación solar diaria, cuyo rango oscila entre 5,5 y 6,0 Kwh/m² día. La Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Ministerio de Agricultura (MINAG) al año 2014 reporta la existencia de 4339 pozos de aguas subterráneas en la zona de estudio, la misma que comprende las localidades de Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope, Pítipo y Salas, cuya explotación se hace generalmente utilizando grupos electrógenos (motores de combustión interna, quemando petróleo o gasolina). Este reporte contiene las características técnicas, mediciones y explotación de los pozos (caudales). Teniendo en cuenta la disponibilidad de la radiación solar local, la demanda hídrica diaria, se determina las características técnicas de diseño de un sistema que permita explotar las aguas subterráneas para fines agrícolas mediante el uso de la energía solar, promoviendo de esta manera la aplicación sostenible de la energía fotovoltaica, como una alternativa limpia y libre de la emisión de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: *bombeo solar, agua subterránea, radiación solar.***ABSTRACT**

The objective of the present research lies in the use of the photovoltaic solar energy in the exploitation of underground water with agricultural purposes in the basin Motupe-Olmos-La Leche, as a better alternative with respect to the traditional method of pumping water using electrogen groups or electric energy. The study zone, according with the Solar Map of Peru elaborated by the Meteorology and Hydrology National Service (SENAMHI) in agreement with the Energy and Mines Minister (MEM) has a high available daily solar radiation, whose values oscillates between 5,5 and 6,0 Kwh/m² day. The Water National Authority (WNA) of the Agricultural Minister (AM) to 2014 reports the existence of 4339 underground water wells in the study zone, the same that it involves the localities of Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope, Pitipo and Salas, whose exploitation is made generally using electrogen groups (inner combustion motors, burning oil and gasoline). This report contains technical characteristic, measurements and exploitation of wells (volume of water). Taking account the available of the local solar radiation, the daily hydric demand, it is determined the technical characteristics of design of a system that let the exploit of underground water with agricultural purposes trough the use of the solar energy, promoting in this way the supporting application of the photovoltaic energy, as a clean alternative and free of emission of gases of greenhouse effect.

Keywords: *solar pumping, underground water, solar radiation.*

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista UCV HACER Campus Chiclayo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

Recibido: 26 de noviembre de 2018**Aceptado:** 6 de marzo de 2019**Publicado:** 15 de marzo de 2019

¹ Lic. en Física, Ingeniero Mecánico Electricista, Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Ambiental, Maestro en Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en energía. Contacto: luisfarfanneyra@yahoo.com  <https://orcid.org/0000-0001-8394-205X>, Perú.

² Lic. en Educación, Ingeniero Agrícola, Maestro en Ciencias con mención en docencia universitaria e investigación educativa, Doctor en Ciencias de la Educación. Contacto: naneniwalter@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1186-549Y>, Perú.

INTRODUCCIÓN

La radiación que emite cotidianamente el sol como astro dador de vida constituye una fuente de energía inagotable, universal, ecológica, gratuita y de disponibilidad inmediata; la misma que puede ser utilizada para la generación de calor y electricidad mediante el uso de colectores solares y paneles fotovoltaicos respectivamente. La tierra recibe del sol una potencia promedio diaria de $1,2 \times 10^{17}$ Watts.

A nivel nacional y en la actualidad, la explotación de las aguas subterráneas se hace generalmente empleando motores de combustión interna y bombas hidráulicas instalados en pozos ya sea tubulares o a tajo abierto, empleándose como fuente de energía los combustibles fósiles (petróleo, gasolina), originando altos costos de precio, operación y mantenimiento de estos sistemas de bombeo, adicionando a esto la contaminación atmosférica local y daños en la salud humana debido a la emisión de gases tóxicos por la quema de dichos combustibles (CO₂, SO₂, NO_x, Pb).

El uso de la energía eléctrica para la explotación de las aguas subterráneas es una buena alternativa, pero para esto el propietario tiene que invertir en la elaboración de un expediente técnico y la ejecución de su obra para luego contar con el suministro eléctrico de parte de la empresa concesionaria de electricidad, cuya facturación por el consumo de la energía eléctrica está supeditada a una potencia contratada mensual y a una tarifa eléctrica industrial asignada.

En este escenario, el propietario se obliga a cancelar mensualmente a la concesionaria de electricidad el costo por la potencia contratada asignada consumiendo o no la energía eléctrica, lo que se ha visto en algunos casos que el propietario ha tenido que resolver el contrato con dicha entidad y retomar el funcionamiento de sus pozos mediante la quema de combustibles fósiles, perdiendo su inversión y quedándose con una infraestructura eléctrica sin utilizar. Esta situación peculiar se presenta debido a que los cultivos que se siembran en la zona de estudio requieren planes de riego sólo en ciertos periodos del año.

Ante la problemática indicada, existe la alternativa y como objetivo general explotar las

aguas subterráneas mediante el uso de la energía solar fotovoltaica para el desarrollo agropecuario y humano, i.e: bombeo solar fotovoltaico; alternativa que en nuestro país de manera muy exigua y aislada se viene utilizando, esto estriba debido al escaso conocimiento sobre las bondades que ofrece el bombeo solar, a la desconfianza de que este sistema pueda funcionar y al alto costo inicial de su instalación, siendo este último el principal obstáculo para su uso generalizado. Situación que puede revertirse mediante charlas técnico-educativas que permitan concientizar al usuario de que se trata de un sistema confiable, duradero, gratuito, ecológico y que como en todo proyecto u obra en ingeniería se debe hacer una inversión inicial, cuyo costo depende fundamentalmente del recurso hídrico a explotar y de la disponibilidad de la irradiancia solar local.

Como objetivos específicos se plantea: determinar el recurso hídrico que se requiere para satisfacer la demanda agrícola según el tipo de cultivo que se siembra, utilizar el recurso solar disponible en la zona de estudio, seleccionar los elementos componentes del sistema solar fotovoltaico, evaluar los impactos ambientales negativos que se generan y una comparación técnico – económico entre el bombeo solar y el bombeo con combustibles fósiles.

A nivel mundial existe una importancia creciente en la elección de generar formas limpias de energía, sobre todo para proyectos de poca potencia como es el caso del bombeo solar; además del ahorro económico a mediano plazo que implica el uso de este método de extracción de agua es también fiable y seguro para la supervivencia de la población beneficiada.

El presente proyecto de investigación está orientado al uso de la energía solar fotovoltaica en la Cuenca Motupe-Olmos- La Leche para la explotación de aguas subterráneas con fines agrícolas; el análisis o tratamiento se puede aplicar en cualquier parte de nuestro país.

De acuerdo al Atlas de Energía Solar del Perú, elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en coordinación con el Ministerio de Energía y Minas (MEM) del año 2003 indica que en la zona norte de nuestro país comprendido entre las latitudes 3o y 8o Sur se cuenta con una alta disponibilidad de energía solar diaria; cuyos

valores oscilan entre 5,5–6,0 Kwh/m² día, lo que garantiza con menores costos la explotación de las aguas subterráneas mediante el empleo de sistemas fotovoltaicos.

La matriz energética del Perú elaborado por el Comité de Operación Económica del Sistema (COES) a enero de 2017 indica que la mayor fuente de generación de energía eléctrica a nivel nacional es la hidroeléctrica con el 67,1 %, seguida del gas natural con el 28,9 % y las energías renovables como la eólica y solar contribuyen escasamente con el 1,4 % y 0,4 % respectivamente. Esto hace pensar que no se cuenta con una política agresiva de parte del estado en tratar de explotar las energías renovables y en particular la energía solar a fin de mejorar nuestra matriz energética, tenemos radiación solar todos los días y aún no hemos aprendido a cosecharla; las energías renovables ya no es una opción a valorar sino es algo imprescindible y totalmente necesario para mejorar la calidad de vida del ser humano.

Consideramos que debe reforzarse la política de gobierno en todos sus niveles respecto al uso de las energías renovables y de manera específica la energía solar, otorgándose créditos a pequeños agricultores y regantes a fin de adquirir paneles fotovoltaicos y bombas solares en sus proyectos de elevación de agua para fines agrícolas.

METODOLOGÍA

a. Recurso hídrico subterráneo y solar disponible.

La zona de estudio de la Cuenca Motupe- Olmos-La Leche está conformada por los Distritos de Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope y Salas pertenecientes a la Provincia de Lambayeque y el Distrito de Pitipo perteneciente a la Provincia de Ferreñafe. En esta zona existen 4339 pozos entre tubulares y a tajo abierto, los mismos que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1

Estado de uso de pozos por localidad

Estado de uso	Localidad							Total
	Motupe	Olmos	Pacora	Jayanca	Chochope	Pitipo	Salas	
Utilizado	751	752	121	565	165	126	147	2627
Utilizable	243	455	119	141	81	18	61	1118
No utilizado	216	60	65	82	23	10	88	544
En perforación	21	0	3	8	5	1	8	46
No existe	4	0	0	0	0	0	0	4
Total	1235	1267	308	796	274	155	304	4339

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego (MINAG) - Autoridad Nacional del Agua (ANA). Censo 2014.

Elaboración: Farfán – Campos

Con respecto al recurso solar disponible en la zona de estudio, existen cuatro formas de obtenerlo:

- Mapa Solar del Perú: aquí se indica que la zona en estudio (comprendida entre las latitudes 6,06° y 6,57° sur) registra alta disponibilidad de energía solar diaria, entre 5,5 a 6,0 Kwh/m².día en la costa norte (entre las latitudes 3° y 8° sur) y gran parte de la sierra sobre los 2500 msnm.

- NASA Surface Meteorology and Solar Energy RETSCREEN data: para esto se hace necesario introducir los valores de la latitud, longitud y

msnm de la localidad de interés y se obtienen los valores de radiación normal directa promedio mensual en Kwh/m² día correspondiente a los últimos 22 años de registrados por satélites instalados en la atmósfera.

- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) – Dirección Zonal 2 en el Departamento de Lambayeque, cuenta con estaciones que registran datos en forma convencional y automatizados; entre otros parámetros climáticos registran valores de temperaturas máxima, mínima y promedio; no registrando datos de radiación solar.

Se puede obtener valores estimados de radiación solar global media mensual a partir valores registrados de temperaturas máximas y mínimas.

- Instalando piranómetros térmicos o fotovoltaicos, también denominados solarímetros, los mismos que miden de manera precisa la intensidad de la radiación solar que incide sobre la tierra. Estos equipos son estandarizados de acuerdo a la Norma ISO 9060, que también es adoptada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

De las cuatro formas de obtener valores de la radiación solar directa en la zona de estudio se ha optado por la segunda, i.e, los datos obtenidos de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy RETSCREEN data.

En la Tabla 2 se muestran los valores máximos, mínimos y promedio anual, indicando el correspondiente mes de radiación solar (I).

Tabla 2
 Valores máximos y mínimos de radiación solar I

Localidad	Imáx.	(Kwh/ m2/día)	Imín.	(Kwh/ m2/día)	lave, anual
	valor	mes	valor	mes	(Kwh/m2/ día)
Motupe	5.58	Nov.	4.33	Jul.	4.97
Olmos	7.03	Nov.	3.5	Ago.	5.38
Pacora	5.58	Nov.	4.33	Jul.	4.97
Jayanca	5.58	Nov.	4.33	Jul.	4.97
Chochope	5.59	Nov.	4.32	Jul.	4.96
Pítipo	5.57	Nov.	4.34	Jul.	4.97
Salas	5.58	Nov.	4.33	Jul.	4.97

Fuente: NASA Surface Meteorology and Solar Energy RETSCREEN data.

Elaboración: Farfán – Campos

b. Ingeniería de diseño de un sistema solar fotovoltaico para explotación de agua subterránea.

b.1 Consideraciones fundamentales

Para este diseño se requiere tener en consideración las siguientes consideraciones fundamentales:

La carga hidráulica diaria requerida (m³/día) para el mes de mayor demanda de agua, la misma que es obtenida teniendo en cuenta el área de cultivo,

tipo de cultivo y riego.

La disponibilidad de la radiación solar directa promedio mensual (Kwh/m²/día) en la zona de estudio.

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques para el bombeo solar de aguas subterráneas.

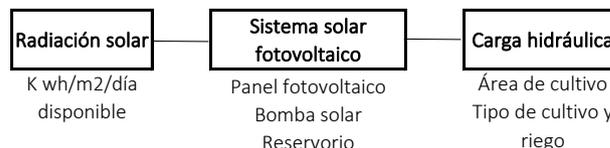


Figura 1. Diagrama de bloques para bombeo de aguas subterráneas.

b.2. Determinación de la energía hidráulica

Uno de los primeros pasos para el diseño de un sistema por bombeo solar es determinar la demanda diaria de agua correspondiente al mes más crítico V_h ; para esto se debe tener en cuenta la extensión agrícola (Ha), tipo de cultivo y su correspondiente requerimiento hídrico (Lt/Ha/día).

La energía hidráulica E_h (Watt-s/día) requerida para disponer el recurso hídrico en el reservorio se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$E_h = \rho g V_h H_t \quad (1)$$

Donde:

- ρ es la densidad del agua (1000 Kg/m³)
- g es la aceleración de la gravedad (9,81 m²/s).
- V_h es la demanda diaria para el mes más crítico (m³/día).
- H_t es la altura total de bombeo incluyendo las correspondientes pérdidas hidráulicas (m).

b.3 Selección del sistema motor-bomba solar y su configuración.

La selección del tipo de bomba solar a instalar es de suma importancia, pues cada modelo tiene un rango óptimo de operación, son diseñadas para trabajar efectivamente durante bajas condiciones de radiación, a voltajes reducidos, sin estancamiento ni sobrecalentamiento.

La bomba solar se selecciona sobre la base de la demanda que debe satisfacer y la capacidad del pozo para producir agua, no es posible extraer mas agua que la cantidad determinada para su

rendimiento máximo; emplear un régimen de bombeo más bajo durante un mayor número de horas de operación y la capacidad de almacenamiento menor de manera ininterrumpida.

Cada tipo de bomba trabaja dentro de un rango de recurso hídrico diario V_h y una altura total de carga hidráulica H_t . La figura 2 muestra la opción de selección de la bomba solar cuando se tiene definido el par ordenado (V_h, H_t) .

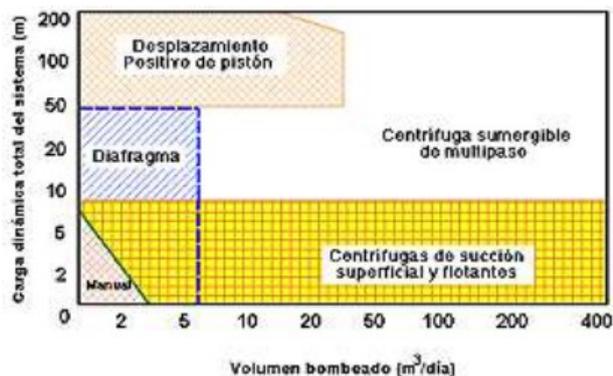


Figura 2. Zonas de traslape entre carga hidráulica y volumen donde se aplica los diferentes tipos de bombas solares.

El motor eléctrico es la máquina que se acopla a la bomba solar y que de su accionar conjunto permite de manera óptima la transformación de la energía solar en energía hidráulica disponible en el reservorio. En este proceso de transformación energética se generan pérdidas, las mismas que quedan cuantificadas si se conocen los valores de sus correspondientes eficiencias.

Los motores eléctricos utilizados para bombeo solar son:

- De corriente continua (CC) de imanes permanentes: con escobillas, sencillos, eficientes para bajas potencias, no necesita circuito de control, muy caros a altas potencias. La desventaja de este motor es que no puede operar directamente en bombas sumergibles.
- De corriente continua (CC) bobinado: sin escobillas (brushless), alta eficiencia mecánica, bajo mantenimiento, con mecanismo electrónico que sustituye a las escobillas, lo que constituye una desventaja pues significa un gasto extra y riesgos adicionales de averías.

- De corriente alterna (CA), mayor disponibilidad en el mercado y rango mas amplio de aplicaciones, son más baratos que los motores de CC, requieren de un inversor de CC/CA, son menos eficientes que los motores de CC debido a las pérdidas de conversión, pueden funcionar por muchos mas años con menos mantenimiento que los motores de CC.

La selección del motor eléctrico según la potencia P de generación en el sistema fotovoltaico se hace de acuerdo a los siguientes rangos:

- Para $P < 3$ HP, se utilizan motores de CC de imanes permanentes.
- Para $3 \leq P \leq 10$ HP, se utilizan motores de CC con bobina en el rotor.
- Para $P > 10$ HP, se utilizan motores de corriente alterna con inversor.

No toda la energía fotovoltaica que recibe el motor eléctrico se transforma en energía mecánica de rotación, es decir tiene su propia eficiencia η_m , cuyo valor depende de su potencia, porcentaje de carga de operación y de su velocidad de giro. En este contexto al igual que la bomba solar se debe recurrir a los datos técnicos del fabricante para el tipo de motor eléctrico seleccionado y obtener el valor de su eficiencia. Sin embargo se puede manifestar que la eficiencia para motores eléctricos en general está comprendido entre el rango de 0,7 a 0.95 de su potencia nominal.

La correspondiente energía E_m que requiere el motor eléctrico para desarrollar la potencia P correspondiente a la energía de bombeo E_b queda determinada por la ecuación:

$$E_m = E_b / \eta_m \quad (2)$$

La configuración o acoplamiento del sistema motor-bomba solar son diversas, dependiendo de las características de bombeo y de la potencia de generación.

Con respecto a las características de bombeo, las más usadas son las que se indican a continuación:

- Conjunto motor-bomba sumergido: es el más habitual en bombeos solares para suministro de agua de boca. Es fácil su instalación a menudo con tubería flexible, dispositivo de bombeo alejado de potenciales daños.

- Bomba sumergida con motor en superficie: de mantenimiento fácil para el motor de imanes permanentes por la accesibilidad para el cambio de las escobillas.
- Conjunto motor-bomba en superficie: configuración que sólo permite bombear agua a una profundidad máxima de 8m.
- Conjunto motor-bomba flotante: la versatilidad de esta configuración es ideal para el bombeo de riego de canales y pozos abiertos.

Con respecto a la potencia de generación existen tres conjuntos de acoplamiento motor-bomba:

- Sistemas de baja potencia (50 a 400 Wp). Se acopla un motor de CC a una bomba de desplazamiento positivo (de membrana). Se instala un convertidor CC/CC entre el panel fotovoltaico y el motor para mejorar su acoplamiento.
- Sistemas de media potencia (400 a 1500 Wp). Puede acoplarse un motor asíncrono accionado por un inversor de frecuencia variable con una bomba centrífuga sumergible multietapa o un motor de CC sin escobillas acoplado a una bomba de desplazamiento positivo helicoidal.
- Sistemas para altas potencias (mayores a 1500 Wp). Puede acoplarse un motor asíncrono o de inducción accionado por un convertidor de frecuencia industrial con una bomba centrífuga sumergible multietapa.

b.4 Dimensionamiento del panel fotovoltaico y acondicionamiento de potencia.

Los paneles solares son fabricados con material semiconductor de silicio cristalino por las siguientes razones:

- Es el segundo material más abundante que existe en la naturaleza, después del aire.
- Debido a su estructura cristalina y enlace covalente es un material muy sensible a la generación de energía eléctrica al ser expuesta como celda a la luz visible de la radiación solar.

El átomo de silicio tiene una energía de ionización de $E_b = 1,12 \text{ eV}$ y de acuerdo a la

teoría de bandas de energía que se estudia en la Física del Estado Sólido tiene un gap de energía (ancho de la banda prohibida) de $E_g = 8,12 \text{ eV}$.

La Figura 3 muestra el esquema de las bandas de energía de un semiconductor, E_c es la energía que requiere un electrón ubicado en la banda de valencia para que genere corriente eléctrica en la banda de conducción. Para el caso del átomo de silicio se tiene:

$$E_c = E_b + E_g = 9,14 \text{ eV} \quad (3)$$

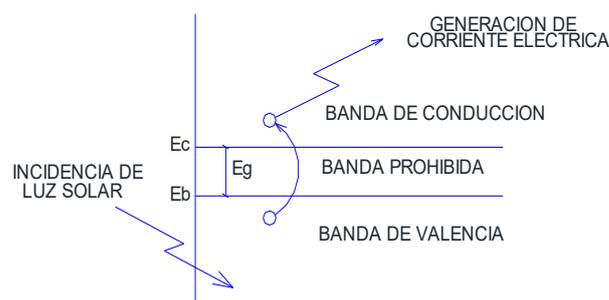


Figura 3. Diagrama de bandas de energía en un semiconductor

Por otro lado, la disponibilidad de radiación solar promedio en la zona de estudio es de 5 Kw-h / m^2 día, equivalente a $11,25 \times 10^9 \text{ eV/m}^2$ día, el cual resulta en $1,23 \times 10^9$ veces el valor de E_c , justificándose de esta manera la alta sensibilidad que tienen los paneles solares fabricados de silicio para generar energía eléctrica cuando son expuestos a la luz solar.

Hay diversas consideraciones que hay que tener en cuenta para el dimensionamiento del generador fotovoltaico, las mismas que se detallan a continuación:

- Demanda diaria de agua para el mes más crítico, el mismo que corresponde al mes de mayor consumo del recurso hídrico.
- Energía solar disponible en la zona de interés, el mismo que corresponde para el mes de más baja radiación solar.
- La orientación del generador fotovoltaico teniendo en cuenta la latitud de la zona de estudio. Esto permite captar de manera óptima el recurso solar disponible para poder convertirla en energía eléctrica.
- Las curvas características del generador fotovoltaico, las mismas que son proporcionadas por el fabricante.

- La eficiencia del panel solar fotovoltaico, la cual es afectada por la temperatura ambiente. Debe también considerarse las pérdidas que se generan en los cables de comunicación entre el panel y el motor eléctrico.
- El arreglo fotovoltaico, es decir la composición serie-paralelo de las celdas solares individuales que permitan generar la energía eléctrica a una determinada corriente y voltaje de operación, acorde con las características eléctricas del motor seleccionado. Este arreglo fotovoltaico debe ser dimensionado como un “traje a la medida”, es decir el necesario para evitar por un lado costos excesivos de suministro de equipos e instalación y por otro lado optimizar el recurso solar justo para satisfacer la demanda hídrica, a diferencia de lo que ocurre con el bombeo de agua mediante la quema de combustibles fósiles.

La Cuenca Motupe-Olmos-La Leche, tiene latitudes comprendidas entre 6° 3’ 51” (Olmos) y 6° 33’ 59” (Pitipo) hemisferio sur. Los fabricantes de paneles solares recomiendan que la inclinación Φ que éstos deben tener para captar el máximo recurso solar debe cumplir la siguiente relación.

$$\Phi = L + 10^0 \quad (4)$$

Donde L es la latitud del lugar:

Para nuestro caso, se puede considerar una inclinación del generador fotovoltaico de $\Phi = 16^0$.

Las curvas características del generador fotovoltaico se detallan en las figuras 4, 5 y 6.

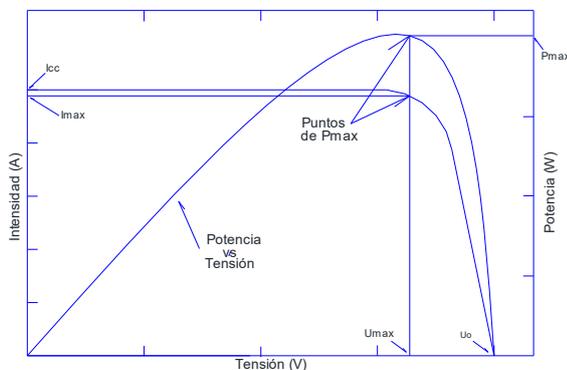


Figura 4. Curvas características de un panel solar fotovoltaico. Intensidad vs Tensión

Fuente: M.Castro, et al 2011. Sistema de bombeo eólicos y fotovoltaicos, PROGENSA. 2da. Edición, España.

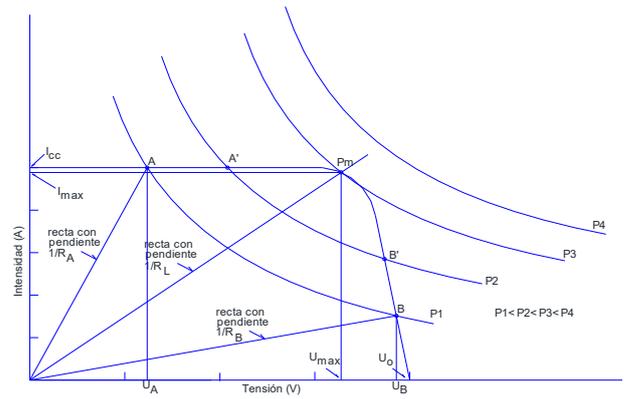


Figura 5. Curvas equipotenciales que cortan la curva intensidad vs Tensión

Fuente: Aaron Sánchez Juárez, et al 2009. Sistema fotovoltaicos iluminación y bombeo. ANES.

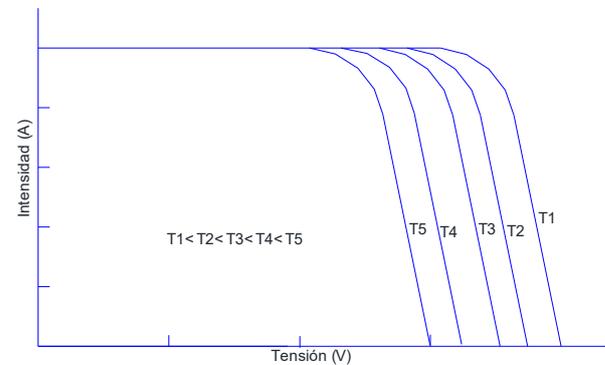


Figura 6. Efecto de la temperatura sobre los parámetros eléctricos del panel solar

La temperatura del medio ambiente afecta a los parámetros eléctricos I, U y P del panel fotovoltaico y por ende su eficiencia.

La eficiencia de un panel fotovoltaico generalmente se mide en condiciones de prueba estándar (STC), es decir a una incidencia normal de 1000 W/m², distribución espectral AM 1,5 y temperatura de célula de 25°C. Otro valor importante proporcionado por el fabricante es la temperatura normal de operación de la celda solar (TONC), la misma que oscila entre 43°C y 49°C, cuando no se dispone de éste dato se puede tomar el valor de 45°C.

Con la información indicada líneas arriba, se determina la temperatura de la celda fotovoltaica Tc y la eficiencia de la celda solar η_T por efecto de la temperatura. Las ecuaciones a utilizar son las que se indican a continuación:

$$T_c = T_a + G(TONC - 25)/1000 \quad (5)$$

$$\eta_T = 1 - 0,0048 (T_c - T_a) \quad (6)$$

Siendo G la irradiancia solar en la zona de interés.

La eficiencia del panel fotovoltaico η_s no es igual a la eficiencia de la celda solar η_T , generalmente es de 1 a 3% inferior a ésta.

Los conductores eléctricos que se conectan entre el panel fotovoltaico y el motor eléctrico, que son de cobre electrolítico de 99,9% de pureza, tienen una eficiencia η_{CE} elevada, del orden del 0,99, de manera que η_s se obtiene de la ecuación:

$$\eta_s = (1 - K) \eta_T \eta_{CE} \quad (7)$$

Donde K toma valores de 1 al 3%.

La Figura 7 muestra un arreglo fotovoltaico típico cuyo número de celdas y disposición depende del consumo de energía requerido y el voltaje de salida que debe ser el mismo al del motor eléctrico seleccionado.

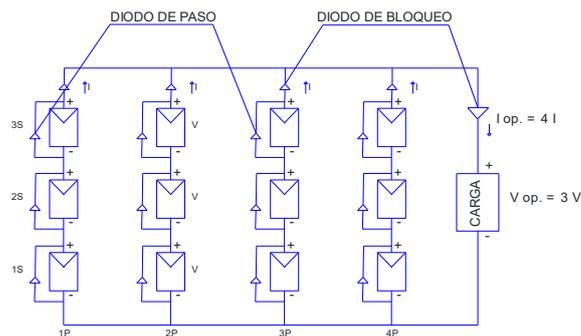


Figura 7. Arreglo fotovoltaico en configuración 3Sx4P

RESULTADOS

Los resultados se obtienen de la aplicación de la metodología indicada a cualquier pozo de agua, pues ésta es de carácter general.

Para efectos de cálculos se ha seleccionado el sector El Arrozal (Motupe), en donde se tiene como principales cultivos al maíz, mango, maracuyá y limón, cuyos consumos hídricos (m^3/Ha -año), denominado coeficiente de riego se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3
Módulos y coeficientes de riego (m^3/Ha) de cultivos

Cultivo	Desagregado mensual volumen de agua por mes de riego-coeficiente de riego (m^3/Ha)												(m^3/Ha)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Maíz amarillo	3000		1600	1600										6200
Mango criollo	800	800	800	800	900	1000	900	1000	1000	1000	900	900	10800	
Maracuyá	2600		1700	1400	1400								7100	
Limón	800	800	800	800	900	1000	900	1000	1000	1000	900	900	10800	
Total (m^3/mes)	7200	1600	4900	4600	3200	2000	1800	2000	2000	2000	1800	1800	34900	
Total ($m^3/día$)	66.7	14.8	45.4	42.6	29.6	18.5	16.67	18.5	18.52	18.52	16.67	16.67		

Fuente: Junta de usuarios Chancay Lambayeque, comisión de regantes de Lambayeque, año agrícola: agosto 2015-julio 2016.

De manera específica se seleccionó el pozo N° 255 que tiene una altura dinámica $H_d = 11,5m$.

Los datos considerados para el diseño se muestran a continuación:

- Recurso hídrico diario: $V_h = 15 m^3/día$.
- Altura total de bombeo:

$$H_t = (H_d + H_r) \times H_p$$

$$= (11,5 + 3,5) \times 1,1 = 16,5 m$$

H_r = es la altura de descarga del agua en el reservorio con respecto al nivel del suelo = 3,5m

H_p son las pérdidas hidráulicas considerado como un 10% de $H_d + H_r$.

- $HSP = 4,21$ es la hora solar pico para la zona de estudio, correspondiente al peor mes (julio).
- Potencia pico del panel solar $P_{ph} : 100 W_p, 12V$.
- Rendimiento mecánico medio (η_m): 25%.

La energía de extracción de agua de pozo es:

$$E_h = 1000 \times 9,81 \times 15 \times 16,5 / 1000 \times 3600 = 0,674 Kw-h/día$$

$$E_e = E_h / \eta_m = 0,674 / 0,25 \approx 2,7 Kw-h/día$$

La potencia del grupo motor-bomba (P_{mb}) es:

$$P_{mb} = E_e / HSP = 2,7/4,21 = 0,641 \text{ Kw.}$$

El caudal requerido (Q) es:

$$Q = V_h / HSP = 15/4,21 = 3,56 \text{ m}^3/\text{h} (0,99 \text{ l/s})$$

La energía requerida en el panel fotovoltaico (E_{ph}) es:

$$E_{ph} = E_e / \eta_c = 2,7/0,95 = 2,84 \text{ Kw-h/día}$$

Donde η_c es la eficiencia de los conductores eléctricos que unen al motor eléctrico con el sistema de los paneles fotovoltaicos.

El cálculo del número de paneles fotovoltaicos (N) es:

$$N = E_{ph} / (P_{ph} \times HSP) = 2,84 / (0,1 \times 4,21) = 6,75 \rightarrow 7 \text{ paneles (paralelo)}$$

Se selecciona 08 paneles (02 grupos en serie con 04 paneles en paralelo por grupo)

A continuación se muestra el correspondiente arreglo fotovoltaico.

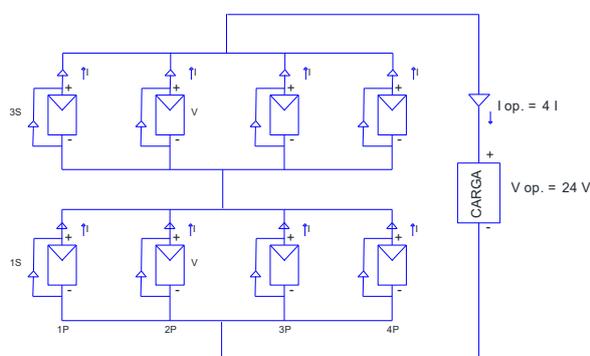


Figura 8. Arreglo fotovoltaico del pozo seleccionado

Como se ha elegido un panel solar de 1 Wp, 12 V, el sistema trabaja a una tensión de 24 V, con una corriente total $I_{op} = 4 (1/12) = 1/3$ Amp.

Para la selección del equipo motor-bomba solar nos referimos a la Figura 2, teniendo en cuenta el recurso hídrico diario (15 m³/día) y una altura total de 16,5m, se selecciona una bomba centrífuga sumergible.

Además, teniendo en cuenta que la potencia requerida es de 0,641 Kw (0,86 HP), se selecciona

un motor eléctrico de corriente continua de imanes permanentes, de 1 HP, 24 V a ser instalado en la superficie del pozo en consideración.

DISCUSIÓN

La investigación aporta como una propuesta concreta a incentivar el uso de la energía solar para el bombeo de agua en lugar de la quema de los combustibles fósiles que no sólo contaminan el medio ambiente circundante sino también afecta a la salud humana.

Si bien es cierto que al inicio el costo de instalación de un sistema solar es caro, en el tiempo resulta económico, pues su inversión se recupera en promedio a los tres años para luego tener energía gratuita durante los veinte y cinco años que dura este tipo de sistemas.

CONCLUSIONES

En la Cuenca Motupe-Olmos-La Leche, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA)-MINAG-Censo 2014, reporta un total de 4339 entre pozos tubulares y a tajo abierto; de los cuales 1118 están en estado de uso utilizables, cuyas aguas subterráneas pueden ser explotados mediante el uso de un sistema de bombeo solar.

El Mapa Solar del Perú elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) indica que la zona de estudio cuenta con una alta disponibilidad de energía solar diaria, la misma que oscila entre 5,5 a 6,5 Kwh/m².día. De acuerdo a la Tabla 2 se considera para efectos de cálculos solares una radiación solar disponible de 4,21 Kwh/m²/día correspondiente al mes de julio.

Para el diseño del bombeo de agua mediante un sistema solar fotovoltaico se necesita conocer fundamentalmente la demanda hídrica requerida y la radiación solar disponible. Para determinar la demanda hídrica se considera la extensión agrícola, tipo de cultivo y tipo de riego correspondiente al mes de mayor consumo de agua.

El bombeo solar fotovoltaico es caracterizado como el bombeo de caudales pequeños, extrae las aguas subterráneas de manera racional y necesaria justo para satisfacer la demanda hídrica del usuario, haciéndolo ambientalmente sostenible y sustentable en el tiempo, evitando el agotamiento prematuro del acuífero en consideración. Asimismo este sistema es prácticamente no contaminante.

Se ha aplicado la metodología indicada a un pozo de agua en particular en donde se han realizado cálculos de ingeniería para la selección de sus componentes, i.e: bomba solar, motor eléctrico y arreglo fotovoltaico.

REFERENCIAS

- Alonso M., Chenlo F. 1999. Diseño y Dimensionado de Sistemas de Bombeo Fotovoltaico (Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica). Edit. CIEMAT.
- Ayala A. 2012. Bombeo de agua con renovables. CPR MERIDA. España.
- Castro M., et al.2011. Monografías Técnicas de Energías Renovables: Sistemas de Bombeo Eólicos y Fotovoltaicos. Edit. PROGENSA, España.
- Figuroa H., Lard. M. 2014. El auge de la energía solar fotovoltaica en sistemas de riego. Lorentz-Solergiza.
- Marcelo D. 2013. Energía Solar Fotovoltaica: Bombeo Solar Fotovoltaico. Lambayeque-Perú.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAG)-Autoridad Nacional del Agua (ANA). 2015. Características Técnicas, Mediciones y Volúmenes de Explotación de Pozos. Lima-Perú.
- Ministerio de Energía y Minas. 1990. Mapa solar del Perú. Lima-Perú
- NASA. Surface Meteorology and Solar Energy, USA, 2013.
- Ortiz J., Marcelo D. 2013. Dimensionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico para una zona rural de piura, Perú.
- Sánchez A. 2009. Sistemas fotovoltaicos iluminación y bombeo. ANES, España.
- Tobajas M. Energía.2005. Solar Fotovoltaica. 2da. Edición. Ediciones CEYSA, España.