

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
La energía fotovoltaica en el riego agrícola: Revisión de literatura

Estudiante

Hector Antonio Fajardo Menjivar

Asesores

Jose Adrian Ordoñez Bonilla, Mtr.

Julio Lopez, M. Sc.

Honduras, agosto 2021

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA MARGARITA MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ROGEL CASTILLO

Director Departamento Ciencia y Producción Agropecuaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Contenido.....	3
Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	6
Resumen	7
Abstract.....	8
Introducción.....	9
Materiales y Métodos.....	12
Resultados y Discusión.....	13
Comparación Entre Opciones de Sistemas de Bombeo.....	13
Energía Fotovoltaica	13
Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR)	14
Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA)	15
Sistemas Fotovoltaicos de Bombeo	17
Configuraciones de un Sistema Fotovoltaico de Bombeo	19
Componentes de un Sistema Fotovoltaico de Bombeo.....	19
Motor	20
Bomba	21
Sistema de Control.....	22
Diseño de un Sistema Fotovoltaico de Bombeo	23
Diseño Basado en la Demanda de Agua	24
Diseño Basado en el Diseño de los Componentes del Sistema de Bombeo.....	24

Diseño Basado en el Análisis Financiero	25
Sistemas Fotovoltaicos de Bombeo Instalados.....	26
Sistemas Agrivoltaicos	27
Conclusiones	30
Recomendaciones.....	31
Referencias.....	32

Índice de Cuadros

Cuadro 1 <i>Comparación entre diferentes opciones de bombeo utilizados.....</i>	13
Cuadro 2 <i>Características de un motor con su bomba ideal.</i>	21
Cuadro 3 <i>Sistemas de control para sistemas de bombeo fotovoltaico con mayor popularidad y eficiencia.</i>	23
Cuadro 4 <i>Algunos sistemas de bombeo fotovoltaico instalados alrededor el mundo.</i>	27
Cuadro 5 <i>Características de los sistemas agrivoltaicos y sistemas fotovoltaicos.</i>	29

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Esquema de un sistema conectado a la red</i>	14
Figura 2 <i>Configuraciones típicas de los sistemas fotovoltaicos autónomos</i>	16
Figura 3 <i>Componentes de un sistema fotovoltaico de bombeo</i>	18
Figura 4 <i>Estructura de los sistemas AV y su eficiencia</i>	29

Resumen

Los sistemas de riego presurizados impulsados por bombas eléctricas o de combustión son los sistemas más populares. Sin embargo, en los últimos años debido a la contaminación ambiental y los altos costos de operación de estos sistemas, se ha optado por alternativas ecológicas y con menores costos de operación, un ejemplo de esto es la energía fotovoltaica. Los objetivos de este estudio fueron establecer el beneficio de la energía fotovoltaica en el riego, la viabilidad de su uso, las diferentes configuraciones posibles de los sistemas de bombeo fotovoltaicos y determinar la mejor opción para implementar en Zamorano. Se realizó una recopilación de información sobre los usos de la energía fotovoltaica en el riego a partir de una revisión de literatura. La temática se desarrolló en torno a los diferentes sistemas fotovoltaicos, que son los sistemas conectados a la red y sistemas autónomos, enfocados principalmente en su uso en sistemas de bombeo de agua para riego, en sus diferentes configuraciones. Los sistemas de energía fotovoltaica han llamado la atención debido a sus características amigables con el ambiente, larga vida útil, bajos costos de operación y mantenimiento requerido para su operación. La inclusión de la energía fotovoltaica en el riego y agricultura permitirá una producción adaptada a las nuevas demandas medioambientales. Los sistemas fotovoltaicos de bombeo requieren de una alta inversión inicial, sin embargo, el costo por litro de agua bombeado es menor a los demás sistemas de bombeo. Hay una gran variedad de configuraciones de sistemas de bombeo fotovoltaico, sin embargo, no existe un sistema mejor que otro, sino que cada uno se debe diseñar de acuerdo con las necesidades de cada zona. Para las condiciones de Zamorano se recomienda un sistema de bombeo fotovoltaico conectado a la red.

Palabras clave: agricultura sostenible, bombeo solar, irrigación solar, sistemas agrivoltaicos

Abstract

Irrigation systems driven by electric, or combustion pumps are the most popular systems. However, in recent years due to environmental pollution and the high operating costs of these systems, ecological and lower-cost alternatives have been sought. An example of this is the photovoltaic energy. The objectives of this document were to establish the benefit of photovoltaic energy in irrigation and the viability of its use, determining the different possible configurations of photovoltaic pumping systems and the best one for Zamorano. A compilation of information on the uses of photovoltaic energy in irrigation was made from a literature review. The theme was developed around the different photovoltaic systems, which are systems connected to the grid, autonomous systems, focused mainly on their use in irrigation water pumping systems. Photovoltaic energy systems have attracted attention due to their environmentally friendly characteristics, long useful life, low operating, and maintenance costs required for their operation, the inclusion of photovoltaic energy in irrigation and agriculture will allow a production adapted to the new environmental demands. Photovoltaic pumping systems require a high initial investment, however, the cost per liter of water pumped is lower than other pumping systems. There is a great variety of configurations of photovoltaic pumping systems, however, there is no better system than another, but each one must be designed according to the needs of each area. For Zamorano conditions, a grid-connected photovoltaic pumping system is the most recommended.

Keywords: sustainable agriculture, solar pumping, solar irrigation, agrivoltaic systems

Introducción

La agricultura es un conjunto de actividades humanas que tratan el suelo para la producción de diferentes cultivos, los primeros registros de agricultura datan de hace miles de años, cuando comenzó la domesticación de plantas. Actualmente esta tiene mucha importancia económica siendo esta la base de la seguridad alimentaria, principalmente en países en vías de desarrollo. Se estima que la agricultura sigue siendo la única fuente de ingresos de alrededor del 70 por ciento de la población rural de menores ingresos del mundo, cuya mayoría son pequeños campesinos (García 2006). La agricultura también juega un papel importante en el producto interno bruto de los países, en los países menos adelantados contribuye con un porcentaje elevado al producto interno bruto (PIB) (del 30 al 60 por ciento en casi dos tercios de estos países) (FAO 2001). Los recursos, prácticas y tecnologías para mejorar los rendimientos en la agricultura son muy amplios.

La producción de alimentos y el uso de agua están estrechamente relacionados. El agua siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola en gran parte del mundo, donde la precipitación no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos (FAO 2012). El riego es una práctica agrícola que consiste en suministrar agua a los cultivos con el fin de satisfacer la demanda de estos. La demanda de los recursos hídricos crece en la misma proporción que crece la agricultura, por esta razón se está generando una competencia por poseerlos. Para suplir la demanda de todos los productores, incluso los que tienen el menor acceso a este recurso, se han desarrollado significativas innovaciones y conocimientos tecnológicos en el riego, implementando cada vez tecnologías más disponibles y eficientes. Una de las problemáticas a la cuales los sistemas de riego se han tenido que enfrentar es a la alimentación eléctrica de los sistemas de bombeo, esto es debido a que los sistemas de riego no siempre están instalados cerca de fuentes de energía eléctrica.

Un sistema de bombeo consiste en un conjunto de elementos que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, de forma que se cumplan las especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos (Marigorta et al.

1994). Existen diferentes tipos de sistemas de bombeo, los más utilizados son los eléctricos y los de combustión interna. Los de combustión interna son sistemas costosos (en cuanto a su operación) ya que requieren de combustibles, lubricantes y repuestos; de forma constante son ruidosos y presentan eficiencias muy bajas, por lo cual se recomienda evitar su uso cuando sea posible. Por otra parte, los sistemas eléctricos presentan alto rendimiento, bajo costos de operación y mantenimiento. Esta problemática está quedando a un lado gracias a las energías renovables, que tiene múltiples aplicaciones. La energía renovable es cualquier forma de energía de origen solar, geofísico o biológico que se renueva mediante procesos naturales a un ritmo igual o superior a su tasa de utilización (IICA 2014). La energía solar o fotovoltaica es una de las más utilizadas debido a que la radiación solar llega a todo el planeta. Actualmente este tipo de energía es utilizada en diferentes maneras en el sector agrícola.

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar (Lamigueiro 2012). Un sistema fotovoltaico funciona por el efecto fotovoltaico, cuando la luz solar transporta energía en forma de un flujo de fotones, estos cuando inciden en determinado tipo de materiales bajo ciertas condiciones, provocan una corriente eléctrica (Marín 2004). Los sistemas fotovoltaicos generalmente se dividen en dos grupos: el primer grupo son los sistemas conectados a red y el segundo grupo es de los sistemas autónomos. La radiación solar es la única fuente de energía prácticamente inagotable y renovable con la que se cuenta, es la que menos impactos genera sobre el medio ambiente y además de ser el origen para otras fuentes de energía. La energía que se pueda obtener de este sistema depende de la intensidad de la radiación solar. La irradiancia solar incidente en el suelo no suele superar los 1.000 W/m^2 , dependiendo mucho del lugar, la hora del día, época del año y estado del cielo (Lorente 2010).

A finales de 2017 había instalados 402 GW de energía fotovoltaica en el mundo. De ellos, 131 GW en China, 51 GW en EE. UU., 49 GW en Japón, 42 GW en Alemania, 20 GW en Italia y 5,6 GW en España (Moreton et al. 2018). En América, el mercado aumento ligeramente en 2019, principalmente

a través del mercado estadounidense que experimentó un crecimiento acelerado (13,3 GW), Brasil es el segundo mercado con alrededor de 2,0 GW instalado, seguido de México que instaló alrededor de 1,0 GW, Chile instaló 700 MW, un crecimiento relativamente estable y Argentina instaló alrededor de 500 MW, un nivel récord. América representó alrededor del 16% del mercado fotovoltaico mundial en 2019 (IEA 2020). En varios países, la contribución fotovoltaica a la demanda de electricidad ha superado la marca del 5% con Honduras en primer lugar con casi 15% (IEA 2020).

En Honduras, el uso de la energía eléctrica en el sector agropecuario está limitado por la baja cobertura de la red de energía eléctrica pública, y aunque en relación a los otros países del área Centroamericana el costo de la electricidad es bajo, para el productor agrícola es elevado e incide negativamente en su competitividad, además de esto, el país se enfrenta a una posible crisis de desabastecimiento provocada por el atraso en la realización de las inversiones necesarias para la expansión eficiente del sistema de generación de las redes eléctricas (SAG 2010). Sin embargo, las condiciones climáticas de nuestro país permiten que se pueda desarrollar mucho más la situación actual, de este modo será la principal fuente de abastecimiento de energía eléctrica y un muy buen soporte para la agricultura. El desarrollo de esta tecnología para su aprovechamiento en la agricultura es prometedor, tiene potencial para nuevas tecnologías como para perfeccionar tecnologías ya existentes.

Los objetivos de esta revisión de literatura fueron determinar el beneficio de la energía fotovoltaica en el riego agrícola y la viabilidad de su uso; determinar las diferentes configuraciones posibles de los sistemas de bombeo fotovoltaico, sus características y su nivel de desarrollo alrededor del mundo; y, determinar la mejor configuración de un sistema fotovoltaico de bombeo para las condiciones de Zamorano.

Materiales y Métodos

El presente estudio se basó en la recopilación de información sobre los usos de la energía fotovoltaica en el riego a partir de una revisión de literatura. La temática se desarrolló en torno a los diferentes sistemas fotovoltaicos, que son los sistemas conectados a la red, sistemas autónomos, enfocados principalmente en su uso en sistemas de bombeo de agua para riego.

La investigación se realizó durante los meses de febrero y mayo del 2021, mediante la recopilación de datos a través de una revisión de literatura que brindan fuentes como la Biblioteca Wilson Popenoe y Google Escolar, visitando sitios de relevancia científica tales como FAO, Research Gate y Scielo. La ruta de búsqueda consistió en el uso de palabras claves tales como, energía fotovoltaica, riego en la agricultura, agricultura sostenible, sistemas fotovoltaicos aislados, sistemas fotovoltaicos de bombeo, sistemas fotovoltaicos conectados a red. El contenido de los estudios fue el principal criterio para la elegibilidad e inclusión en el documento. Los artículos consultados fueron escritos en su mayoría en el idioma español e inglés, incluyendo también el portugués. Se incluyeron 61 estudios de los últimos 27 años (1994 a 2021), debido a que es una tecnología que se ha ido perfeccionando durante estos años.

Esta investigación lleva un orden en su estructura de manera que su comprensión sea fácil. Inicia con una comparación entre diferentes sistemas de bombeo, luego se procede a hablar de los sistemas fotovoltaicos junto con sus componentes y diferentes métodos de diseño, para finalizar se ejemplifican sistemas fotovoltaicos de bombeo instalados alrededor del mundo y sistemas agrivoltaicos.

Resultados y Discusión

Comparación Entre Opciones de Sistemas de Bombeo

Los sistemas de bombeo más utilizados en el mundo son los manuales, diésel, eléctricos y fotovoltaicos. Las ventajas y desventajas de los sistemas de bombeo fotovoltaicos frente a los demás sistemas son numerosas (Cuadro 1).

Cuadro 1

Comparación entre diferentes opciones de bombeo utilizados.

Tipo de sistema	Ventaja	Desventajas
Manual (Bomba de pie)	Bajo costo Tecnología simple Fácil mantenimiento Fácil limpieza No necesita alimentación	Mantenimiento regular Bajo caudal Consume tiempo y energía que puede ser empleado con mayor productividad en otras actividades
Fotovoltaico	Bajo mantenimiento Fácil limpieza Fácil de instalar Fiable Larga vida Sistemas modulares No combustible	Relativamente alto coste inicial Producción de agua dependiente de la radiación solar
Diesel	Inversión de capital moderada Portátil Fácil instalación Muy experimentadas	Mantenimiento a menudo inadecuado, reduciendo su vida Combustible caro y suministro intermitentemente Problemas de ruido, suciedad y humos
Eléctrico convencional	Ahorro de mano de obra Adaptabilidad Muy experimentadas	Costes elevados de operación Inversión inicial considerable

Nota. Adaptado de Abella y Romero 2005 y Pereira et al. 2010.

Energía Fotovoltaica

Alexandre Edmond Bequerel descubrió el efecto fotovoltaico al experimentar con una pila electrolítica con electrodos de platino, en la que observó el incremento de corriente que causaba la exposición a la luz de uno de los electrodos (Montoya Rasero 2011). Hasta el año 1954 no se consiguió

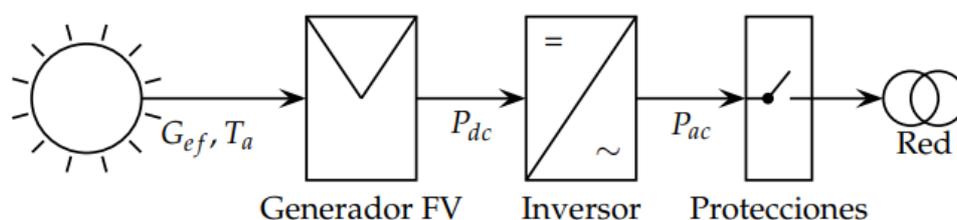
producir la primera célula que aprovecharse dicho efecto con un rendimiento razonable, siendo lograda por la empresa Bell Telephone, en New Jersey. A partir de esta fecha se comenzó a desarrollar el proceso de purificación de monocristales de silicio, dando un enorme impulso a la industria electrónica (Fernández Barrera 2015). La energía fotovoltaica es una tecnología que genera corriente continua (DC) por medio de semiconductores cuando estos son iluminados por un haz de fotones (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones 2002).

Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR)

Los sistemas de generación fotovoltaica acoplados a red se presentan en la actualidad como una alternativa para el desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica renovable y limpia (Cáceres et al. 2013). Estos sistemas tienen como principal función producir energía eléctrica que tenga las condiciones óptimas para que se inyecte a la red de energía eléctrica convencional. Un SFCR se compone del generador o panel fotovoltaico, un inversor de corriente directa o continua a corriente alterna (DC/AC) y un conjunto de protecciones eléctricas, como se aprecia en la Figura 1 (Lamigueiro 2012).

Figura 1

Esquema de un sistema conectado a la red.



Nota. Tomado de Lamigueiro (2012)

En este sistema la energía eléctrica que se produce se consume en el lugar para el cual el sistema fue instalado, todo el exceso producido por el sistema se inyecta a la red eléctrica para el consumo en otra localidad. Existen dos tipos de retribución por todo el excedente que se ingrese a la red de energía eléctrica, son la retribución con prima “feed-in tariff” (FIT) y el balance neto “net-metering” (NM).

La retribución con prima (FIT) provee un precio preferencial garantizado al productor de energía renovable y obliga a los operadores de la red a comprar la producción de electricidad generada, el precio generalmente se garantiza durante un período prolongado, la mayor ventaja de estos esquemas es la certeza a largo plazo del apoyo financiero, que reduce considerablemente los riesgos de inversión (Poullikkas 2013).

El NM es la última política eléctrica propuesta para promover la generación de energía a partir de pequeñas fuentes renovables, a los pequeños productores de energía se les paga por la energía resultante del balance energético de salida y entrada. La principal ventaja del esquema de medición neta radica en su simplicidad, el uso de un solo medidor bidireccional que gira hacia atrás cuando la energía generada excede su propio consumo. Solo se mide la energía neta intercambiada en el punto de conexión, si la generación es mayor que la carga, el consumidor recibe un crédito ya sea en energía o en efectivo por la siguiente factura recibida. De lo contrario, el cliente pagará solo la diferencia entre la energía consumida y la energía producida (Del Carpio-Huayllas et al. 2012 - 2012). Esta alternativa es especialmente atractiva cuando el productor tenga próxima la red eléctrica de suministro. Sin embargo, dependerá de la legislación de cada país; por ejemplo en Honduras se brinda exoneración de todo tipo de impuestos y aranceles para la persona o empresa que produzca energía renovable (Poder Legislativo 2013); en Chile se da una retribución económica por las inyecciones eléctricas al sistema y son valorizadas al precio que los concesionarios de servicio público de distribución traspasan a sus clientes regulados de acuerdo a lo dispuesto en el artículo 158, esta política se mantendrá hasta que logren alcanzar la meta de generar el 80% de su energía eléctrica de recursos renovables (Ministerio de Energía 2012).

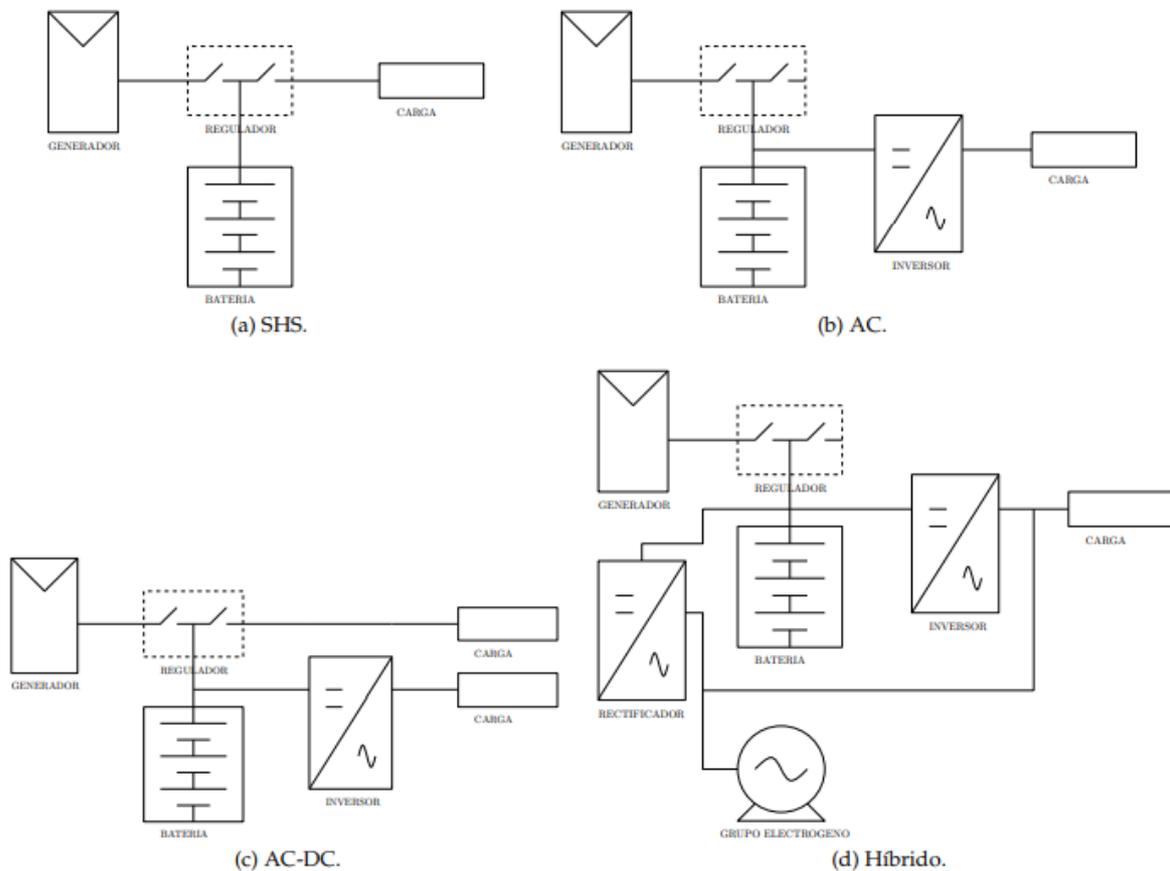
Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA)

Son aquellos que están aislados de la red eléctrica, fueron anteriores en el tiempo a los SFCR, y, aunque si bien estos últimos están consiguiendo un crecimiento muy importante, sobre todo en los países que cuentan con un amplio desarrollo de redes eléctricas en todo su territorio, los SFA siguen

siendo los más empleados en países con poco desarrollo industrial, en zonas rurales, lugares remotos y poco accesibles (Aguilera y Hontoria 2008). En su forma más básica, un SFA consiste del generador, que es el módulo fotovoltaico que convierte la radiación solar en energía eléctrica; un acumulador, que es la batería donde se almacena la energía proveniente del módulo y un regulador, el cual controla la energía producida por el módulo (Style 2012). En la Figura 2 se ilustran estos componentes y posibles configuraciones.

Figura 2

Configuraciones típicas de los sistemas fotovoltaicos autónomos.



Nota. Tomado de Lamigueiro 2012

Los sistemas autónomos domésticos (SHS) generalmente incluyen cargas continuas únicamente, de esta manera se evita la necesidad de los inversores. Los sistemas autónomos híbridos incluyen una fuente de energía auxiliar, que puede estar basada también en una energía renovable, como es el caso de los generadores eólicos, generadores minihidráulicos, etc., o puede incluir una

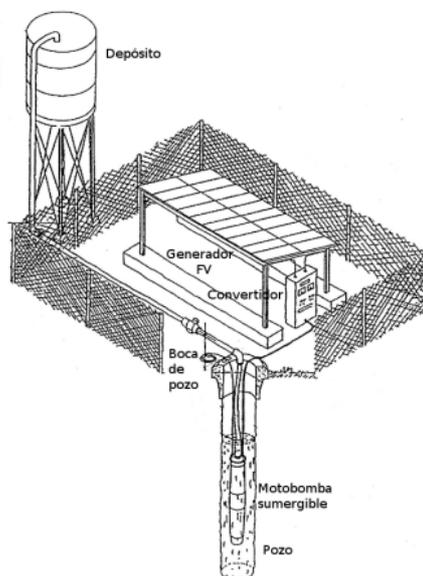
fuentes auxiliar que no depende de la aleatoriedad de las condiciones climáticas, como es el caso de un generador basado en combustibles fósiles (gasóleo, gasolina, gas). En todos los casos, el generador auxiliar o de respaldo complementa y respalda a la fuente de energía principal: el sistema fotovoltaico (Aguilera y Hontoria 2008).

Sistemas Fotovoltaicos de Bombeo

Estos sistemas pueden ser tanto en la modalidad SFCR como SFA. El sistema de bombeo de agua fotovoltaico consta de los mismos elementos que un SFCR o un SFA, con la excepción de que se agrega un equipo de bombeo (motor y bomba) y podría existir una estructura de almacenamiento de agua como se ilustra en la Figura 3. El subsistema de bombeo está compuesto por un grupo motobomba y un equipo de acondicionamiento de energía, el motor puede ser de AC o DC, la bomba puede ser una bomba centrífuga o una bomba de desplazamiento positivo. El acondicionamiento de energía tiene la función de optimizar la transferencia de energía entre el campo fotovoltaico y el grupo motobomba. El acondicionamiento de energía puede ser un inversor DC-AC para un motor AC o un transformador DC-DC para un motor DC. Los elementos de almacenamiento (si existieran) pueden ser baterías para almacenamiento de electricidad o tanque de agua para almacenamiento de agua o ambos (Khatib et al. 2013).

Figura 3

Componentes de un sistema fotovoltaico de bombeo.



Nota. Tomado de Lamigueiro 2012

Se ha demostrado que esta tecnología es un método eficaz y confiable para utilizar la energía solar que llega a la superficie de la tierra para satisfacer las necesidades de bombeo de agua. El sistema de bombeo de agua fotovoltaico solar puede servir como un sistema independiente para obtener agua para el uso final del abrevadero del ganado, sistema de suministro de agua rural / urbano, riego por goteo, riego de superficie como pastos, invernaderos y para uso industrial. La energía solar tiene la ventaja de una disponibilidad abundante, sustentabilidad, amigable con el medio ambiente, y los sistemas fotovoltaicos de bombeo son sencillos de instalar y tienen un costo mínimo a largo plazo. Por lo tanto, esto hace que la energía solar sea la fuente de energía de entrada más preferida para el sistema de bombeo de agua en regiones remotas, deshabitadas y con escasez de electricidad en la red de muchos países en desarrollo como la India (Sontake y Kalamkar 2016). Las desventajas de estos sistemas son que los sistemas descentralizados son difíciles de regular (generalmente reemplazan sistemas ya descentralizados) lo que aumenta el bombeo ilegal; posible sobreexplotación del agua subterránea provocando degradación de los recursos y la producción de los paneles requiere algunos minerales raros o toxinas, aunque su impacto es ínfimo se deben desechar correctamente para evitar

daños al medio ambiente (FAO 2018). La fabricación de un panel solar requiere también la utilización de materiales como aluminio (para los marcos), vidrio (como encapsulante), acero (para estructuras) etc, siendo estos componentes comunes con la industria convencional (Ecologistas en Acción 2007). Los materiales semiconductores que tradicionalmente han sido utilizados y que continúan en investigación para usos fotovoltaicos son silicio cristalino (mono y policristalino); silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H); materiales del tipo III-V con GaAs, InP, GaInP, AlGaAs; materiales del tipo II-VI: CdS, CdTe; materiales compuestos: $\text{Cu}_2\text{InGaSe}_4$, CuInSe_2 (CIS), CuInGaSe (CIGS) (Martínez Bogado 2004).

Configuraciones de un Sistema Fotovoltaico de Bombeo

Los principales factores que determinan la configuración de un sistema de bombeo fotovoltaico son las condiciones hidráulicas y la energía suministrada por el generador fotovoltaico a lo largo del día, determinada por la radiación solar y las condiciones climatológicas; dentro de las condiciones hidráulicas encontramos la profundidad del nivel agua en el pozo bajo la superficie, la altura estática de elevación del agua por encima de la superficie del suelo y las pérdidas adicionales de presión en tuberías y accesorios (Abella y Romero 2005). Ejemplos de las posibles configuraciones para un sistema fotovoltaico de bombeo son sistemas de bombeo fotovoltaico para acumulación de agua en estanques (“off grid”), sistemas de bombeo fotovoltaico para distribución directa al campo mediante un sistema de riego tecnificado (“off grid”), sistemas de bombeo fotovoltaico para distribución directa al campo mediante un sistema de riego tecnificado (“on grid”) y reconversión energética (“on grid”) (Ordoñez Bonilla 2018).

Componentes de un Sistema Fotovoltaico de Bombeo

Consisten en paneles solares fotovoltaicos, un motor y una bomba. Dependiendo del diseño del sistema, requiere baterías de almacenamiento y un regulador de carga, la salida actual del sistema. Si el motor utiliza AC, es necesario instalar un convertidor DC/AC. Los sistemas fotovoltaicos de bombeo sin batería son de bajo costo, lo que requiere menos mantenimiento en comparación con los

sistemas alimentados por batería. Sin embargo, las baterías de almacenamiento tienen la ventaja de proporcionar un rendimiento consistente durante horas de la tarde y noche. La adición de un tanque de almacenamiento de agua es más económica que el respaldo de almacenamiento de baterías (Solomon et al. 2021).

Motor

En los sistemas de bombeo fotovoltaicos se utilizan motores AC y DC. La elección adecuada del motor se basa en el tamaño, la eficiencia del sistema, el precio, la entrada de potencia, la disponibilidad del sistema y la condición de mantenimiento. Los motores DC son más atractivos porque se pueden conectar directamente al sistema fotovoltaico, no necesitan ningún inversor o controlador, ya que se pueden conectar directamente se utilizan en sistemas de baja potencia (Kumar S y Kumar S 2020) . Los motores AC requieren de un inversor para convertir la salida de matriz fotovoltaica de DC a AC. El uso de inversor conduce a energía y costo adicional, disminuyendo la eficiencia del sistema hasta cierto punto (Verma S et al. 2020). Cabe mencionar que cada motor que se elija tiene una bomba como complemento idóneo para maximizar su eficiencia, por un motor DC de derivación es utilizado con una bomba centrífuga en lugar de una helicoidal para alcanzar su máxima eficiencia, tal como se muestra en el cuadro 2, además se muestran otras combinaciones ideales de motor y bomba.

Cuadro 2

Características de un motor con su bomba ideal.

Motor	Bomba ideal	Características	Fuente
Motor en derivacion (DC)	Bomba centrífuga	La velocidad del motor es constante durante la mayor parte del día, tiene una eficiencia superior al 75%, sobre impulsos de voltaje o corriente permanecen por un corto periodo de tiempo.	(Metwally y Anis 1996)
Motor de reluctancia conmutada (AC)	Bomba centrífuga	Tienen mayor eficiencia y menor costo en comparación con los motores de inducción o DC. El motor alcanza hasta 85% de eficiencia y el sistema alcanza 95%, las pérdidas se dan en la bomba y tuberías esto cuesta un tercio de la energía total.	(Metwally y Anis 1994)
Motor sin escobillas (DC)	Bomba helicoidal	El motor presenta una eficiencia variable de 80-90%, necesita poco mantenimiento, tiene un gran torque, fue diseñado en el programa PSI/e. El sistema presenta una eficiencia entre el 30-50%.	(Langridge et al. 1996)
Motor de inducción (AC)	Bomba centrífuga	La mayor eficiencia es alcanzada a las frecuencias más altas, pero se recomienda su operación a frecuencias nominales. Las simulaciones matemáticas de su desempeño son bastante acertadas, esto se comprobó a través de sistemas instalados en la región desértica de Jordania.	(Daud y Mahmoud 2005)

Bomba

El bombeo de agua se basa en la tecnología fotovoltaica que convierte la luz solar en electricidad para bombear agua. Los paneles fotovoltaicos están conectados a un motor (DC o AC) que convierte la energía eléctrica suministrada por el panel fotovoltaico en energía mecánica que se convierte en energía hidráulica por la bomba. La capacidad de un sistema de bombeo para bombear agua es una función de tres variables principales: presión, flujo y potencia de la bomba. Para fines de diseño, la presión puede considerarse como el trabajo realizado por una bomba para elevar una cierta

cantidad de agua hasta el tanque de almacenamiento. La diferencia de elevación entre la fuente de agua y el tanque de almacenamiento determina el trabajo que una bomba debe hacer. La bomba de agua extraerá una cierta potencia que una matriz fotovoltaica necesita suministrar a través de un motor (Sontake y Kalamkar 2016). Los cuatro tipos de bombas más utilizadas son la bomba helicoidal, diafragma, centrífuga y de desplazamiento positivo. La bomba helicoidal es capaz de bombear a mayores profundidades que la bomba de diafragma y con una vida útil más prolongada. La bomba de diafragma fue especialmente diseñada para bombeos de baja a moderada profundidad con la ventaja de requerir poca potencia para su operación. Para la bomba helicoidal la eficiencia es hasta del 60% y la de diafragma alcanza el 48% (Vick y Clark 2011). La bomba centrífuga es comúnmente utilizada por su bajo mantenimiento y alto volumen de bombeo, su caudal varía de acuerdo con los demás componentes. Tiene una alta eficiencia, pero la pierde al trabajar fuera de la velocidad nominal. La bomba de desplazamiento positivo es raramente utilizada por su alta demanda de mantenimiento y poco volumen de bombeo, su caudal es independiente a los demás componentes. Es capaz de mantener su eficiencia aun trabajando fuera de la velocidad nominal (Hamidat y Benyoucef 2008). El proceso de selección de una bomba para riego consta de varias etapas que van desde la determinación de los parámetros de instalación hasta la selección definitiva y especificación del modelo seleccionado, los parámetros relativos a la bomba se obtienen mediante ensayos de laboratorio realizados por los fabricantes (García et al. 2003).

Sistema de Control

Los sistemas de control no son componentes básicos de un sistema de bombeo, pero para alcanzar los mejores rendimientos y con el fin de darlos a conocer se presentan. El modelo productivo y preciso del sistema de control es un parámetro importante y esencial para gobernar el rendimiento del sistema de bombeo de agua (Verma S et al. 2020). Los sistemas de control todavía están en desarrollo, en la actualidad los sistemas con mejores resultados son los presentados en el cuadro 3.

Cuadro 3

Sistemas de control para sistemas de bombeo fotovoltaico con mayor popularidad y eficiencia.

Sistema	Características	Fuente
Sistema de control Novel	Gestiona el suministro de agua en base a la disponibilidad de agua subterránea y la demanda de agua. El sistema regula la cantidad de agua suministrada en base al promedio diario o mensual, de esta manera se evitan la sobreexplotación de los recursos hídricos.	(Campana et al. 2014)
Sistema de control de lógica difusa	La lógica difusa maximiza la eficiencia global al maximizar la velocidad de conducción y la tasa de descarga de agua. Este sistema crea los controles basados en reglas y observaciones cualitativas. Es uno de los mejores sistemas de bombeo de agua de accionamiento, sin embargo, carecen de la capacidad de optimización y aprendizaje.	(Benlarbi et al. 2004)
Sistema de control con algoritmo de gestión	Los sistemas de control con algoritmo de gestión tienen como objetivo maximizar la utilización del sistema fotovoltaico, extendiendo el tiempo de bombeo de agua y limitando la descarga completa de la batería. Este sistema presenta la misma eficiencia a través de las diferentes estaciones. Aumenta en un promedio de 5 horas 23 minutos el tiempo de bombeo de agua, logra el 97% de eficiencia.	(Sallem et al. 2009)
Sistema de control con lógica difusa y controlador integral proporcional	Este sistema utiliza un rastreador de punto de máxima potencia, de esta manera logra aumentar la eficiencia general del sistema de bombeo. Este tipo de control aumenta el torque inicial y los parámetros de fuerza del sistema de bombeo, además tiene capacidad de optimización. El único problema de este sistema de control es que se configura a prueba y error.	(Terki A et al. 2012)

Diseño de un Sistema Fotovoltaico de Bombeo

El diseño y dimensionado de un sistema fotovoltaico de bombeo depende de muchos elementos como la capacidad del tanque de almacenamiento, configuración del sistema fotovoltaico, análisis financiero, etc. Es de suma importancia tomar en cuenta todos los factores debido a que su omisión

puede derivar en un suministro deficiente de agua, un ciclo de vida útil más corto, mayor costo de mantenimiento. El diseño se puede realizar de tres maneras.

Diseño Basado en la Demanda de Agua

La radiación solar y el caudal del agua varían a lo largo del año, dependiendo de las estaciones. Los sistemas de bombeo fotovoltaico que su diseño está basado en la demanda de agua del sistema utilizan esta misma como referencia para determinar los componentes y su tamaño. Un modelo transitorio realizado en Rumania, con la finalidad de alimentar durante todo el año un sistema de bombeo, incluía una matriz fotovoltaica, un conjunto de células fotovoltaicas, baterías eléctricas, un tanque de almacenamiento y un modelo de datos meteorológicos. Como resultado de este modelo se concluyó que el uso de un tanque de almacenamiento de agua mejora el desempeño del sistema y la potencia mecánica que almacena el agua al estar en el tanque ayuda en los días de baja radiación (Badescu 2003). Una segunda prueba de este mismo modelo transitorio indicó que lo más importante del diseño del sistema es el tanque de almacenamiento, ya que este cubrirá la falta de potencia del sistema cuando la radiación solar no sea la requerida (Odeh et al. 2006). El modelo para caracterizar subsistemas de bombas de motor logra predecir con precisión el flujo de salida de agua, para ello expresa directamente el flujo de salida o caudal basado en la potencia de entrada; con este mismo modelo, se demuestra que los bombeos fotovoltaicos tienen el costo anual más bajo en comparación con las instalaciones alimentadas con combustibles fósiles (Ould-Amrouche et al. 2010).

Diseño Basado en el Diseño de los Componentes del Sistema de Bombeo

El tamaño y dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico depende de los componentes que tenga el sistema. El sistema de bombeo, sistema de almacenamiento y sistema fotovoltaico son los que tienen mayor influencia en esto. Al diseñar el sistema de bombeo en base a los componentes se tiene la facilidad de poder predecir su eficiencia al hacer un análisis de la eficiencia de cada componente. Para diseñar un sistema de bombeo en base a sus componentes se han

desarrollados diferentes modelos a seguir. En Jordania, se desarrolló un modelo que busca la operabilidad de una bomba por un periodo de 25 años, se obtuvo el dato de eficiencia del sistema solar y se tomó en cuenta tanto el peor mes de radiación solar como el de mejor radiación solar para determinar la cantidad mínima de paneles solares a instalar para que la bomba pueda operar sin complicaciones. El procedimiento de dimensionamiento consiste en diseñar cada componente individualmente y medir el efecto en el rendimiento general integrado del sistema (Ebaid et al. 2013). Un estudio realizado en Argelia tenía como objetivo administrar agua a las zonas remotas de la parte sur y norte del país, el modelo adoptado para diseñarlo fue basado en la potencia máxima del sistema solar, la capacidad de almacenamiento del tanque y el sistema de bombeo. Los autores informaron que el rendimiento del sistema de bombeo fotovoltaico depende en gran medida de la potencia máxima de la matriz fotovoltaica y de la cabeza total. Algunos modelos multi-objetivos se utilizan en el dimensionamiento del sistema de bombeo no sólo para predecir la producción de agua, sino también para la predicción óptima del tamaño (Hamidat y Benyoucef 2008). Un modelo híbrido de simulación matemática toma en cuenta las demandas o retos a satisfacer por parte de los componentes para determinar los componentes; las variables pueden ser el cultivo, el método de riego, el clima local (Glasnovic y Margeta 2007).

Diseño Basado en el Análisis Financiero

Cuando la principal limitante en la instalación de un sistema de riego fotovoltaico es la económica, es indispensable diseñar el sistema en base a un análisis financiero para no incurrir en una ineficiencia del sistema por una incorrecta planificación. El enfoque que más se utiliza en el diseño económico es el costo del ciclo de vida del sistema, esto se debe a que es una de las maneras más fáciles de hacer comparaciones entre diferentes sistemas. En las zonas remotas o aisladas el factor más determinante de todos es la de los costos de instalación y si la zona es muy remota la factibilidad de poder realizar la instalación. Un estudio realizado para las zonas aisladas indica que la inversión y

los costos del agua disminuyen con un aumento de la falta inadmisibles de agua o pérdida de carga y autonomía (Ramos JS. y Ramos HM. 2009). Un estudio de diseño en modo conmutado buscaba establecer el mejor diseño posible con el costo mínimo; se observó que los parámetros físicos que más influyen en el costo del sistema son el tamaño de las baterías, el tamaño de la matriz fotovoltaica y el tamaño del tanque de almacenamiento. Como resultado, el estudio indicó que minimizar el tamaño de la matriz fotovoltaica optimiza lo suficiente los costos para obtener un ciclo de vida con costo mínimo para satisfacer los requisitos específicos de agua (Anis y Nour 1994).

La probabilidad de pérdida de fuente de alimentación es un método moderno para el diseño de los sistemas de bombeo, su objetivo no es de costos mínimos, sino que solo su optimización. Utilizando este método se realizó un estudio en Adrar, Argelia, este proyecto cuenta con una demanda de 60 m³ diarios y una altura de bombeo de 45 metros. Se utilizó la relación volumétrica entre el déficit de agua y la cantidad de agua necesaria en el proyecto para dimensionar y optimizar el tanque de almacenamiento de agua y la matriz fotovoltaica, se generaron simulaciones para determinar los resultados, estos indicaron que se requiere una matriz fotovoltaica bastante grande y un tanque de almacenamiento pequeño, por lo tanto se concluye que la relación de los componentes en el diseño basado en el análisis financiero no es directamente proporcional (Bouzidi 2013). Investigaciones han llegado a la conclusión que mediante la probabilidad de pérdida de fuente de alimentación el tanque de almacenamiento solo debe contar con un rango del 50-70% de la demanda hídrica diaria (Bakelli et al. 2011) .

Sistemas Fotovoltaicos de Bombeo Instalados

En lugares con acceso a la red eléctrica y con una buena legislación energética, lo mejor sería un sistema fotovoltaico conectado a la red. Por otro lado, en lugares remotos sin acceso a la red eléctrica lo mejor sería un sistema de riego con bombeo fotovoltaico para almacenamiento de agua en un estanque de acumulación colocado a una altura considerable. A continuación, en el cuadro 4 se dan más ejemplos detallados de sistemas de bombeo fotovoltaicos instalados por todo el mundo.

Cuadro 4

Algunos sistemas de bombeo fotovoltaico instalados alrededor el mundo.

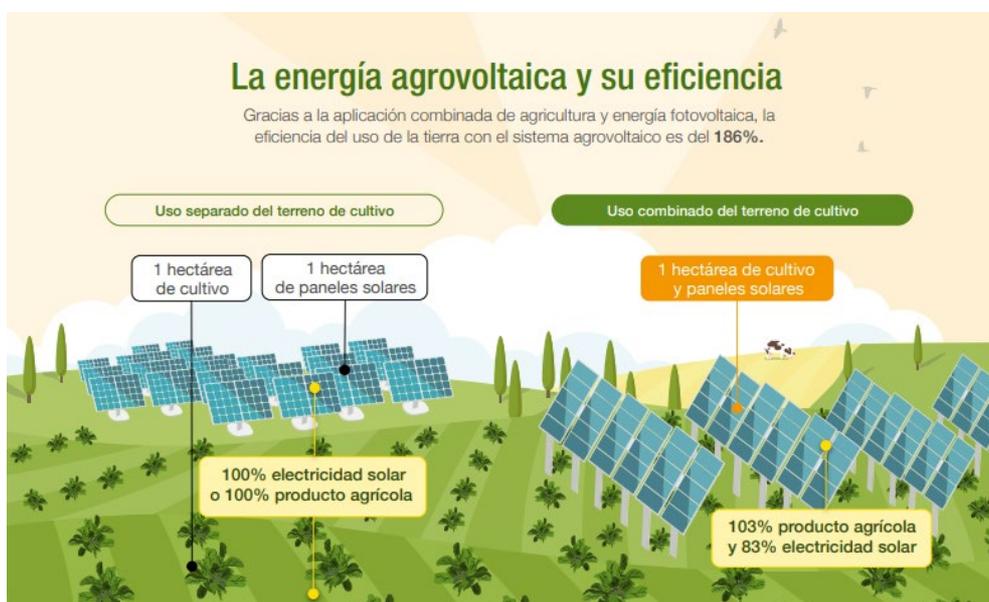
País	Características	Fuente
Arabia Saudi	Sistema ubicado en Madinah, emplea una bomba sumergible helicoidal que eleva el agua de 50 a 80 m con un caudal máximo de 50 m ³ /d. Recibe una radiación solar diaria promedio de 6500 W/m ² debido a que está ubicado en una zona semiárida.	(Benghanem et al. 2014)
España	Sistema diseñado para los invernaderos de Almería, tiene 4 bombas diferentes que se activan a medida incrementa la radiación solar, al estar en 1000 W/m ² funcionan las 4 bombas otorgando 8 m ³ /h y un máximo de 60 m ³ /h.	(Reca et al. 2016)
India	Situado en la zona árida, es un sistema diseñado para una granja. Con una radiación solar de 900 W/m ² tiene la capacidad de dar un caudal de 14.5 m ³ /h y elevación de agua de más de 100 m. Tiene un retorno de inversión de 6 años.	(Pande et al. 2003)
Perú	Sistema ubicado en Cusco con almacenamiento de agua en un tanque elevado a 10 m sobre el nivel del suelo, cuenta con un caudal medio de 1.09 m ³ /h a una radiación promedio de 750 W/m ² .	(Asmat 2018)
Colombia	Sistema estándar para las áreas rurales de Barranquilla, con almacenamiento de agua en tanque. Con una radiación de 830 W/m ² tiene un caudal máximo de 68 m ³ /h y capacidad máxima de elevar el agua a 40 m.	(Ruiz 2021)

Sistemas Agrivoltaicos

El concepto de sistema agrivoltaico (AV) fue introducido por Goetzberger y Zastrow en 1981, al estudiar el uso combinado de la tierra para la producción concomitante agrícola-eléctrica, como se ilustra en la figura 4 (Goetzberger y Zastrow 1982).

Figura 4

Estructura de los sistemas AV y su eficiencia.



Nota. Tomado de IBERDROLA 2021

La idea de sistema AV está relacionada en cierto modo con el sistema agroforestal de intercultivo, este último se refiere a la asociación en una misma parcela de un cultivo anual de porte bajo que se desarrolla en las calles de una plantación forestal en líneas, con la diferencia que las hileras de árboles son sustituidas por hileras de paneles fotovoltaicos (Wang et al. 2019 - 2019). Esto reduce la competencia por las tierras agrícolas y contribuye a un uso más eficiente de la tierra, dice Max Trommsdorff, líder del grupo de agrovoltaica en Fraunhofer ISE (Roca 2021). La demanda mundial de energía se puede satisfacer utilizando energía fotovoltaica si al menos el 1% de las tierras agrícolas se convirtieran en sistemas AV. Las principales coberturas de tierra asociadas con el mayor potencial de energía solar fotovoltaica son las tierras de cultivo, los pastizales y los humedales (Adeh et al. 2019). Los paneles solares son más productivos con abundante insolación, vientos suaves, temperaturas moderadas y baja humedad. Estas son las mismas condiciones que son mejores para los cultivos agrícolas, y se ha demostrado que la vegetación es más eficiente en el uso del agua disponible en condiciones másicas donde la demanda de evaporación atmosférica se equilibra con el suministro de

precipitación (Good et al. 2017). El objetivo del Departamento de Energía de los Estados Unidos es alcanzar un costo nivelado de energía para la energía solar fotovoltaica de \$ 0.03 por kilovatio hora a escala de servicios públicos para 2030 (Delucchi y Jacobson 2011). El coste energético que supone el funcionamiento de los equipos de bombeo durante la campaña de riego puede suponer para el agricultor un 30-40% de los costes totales del cultivo (Universidad de Castilla - La Mancha 2009). En adición, los expertos aseguran que la planta de energía solar reduce efectivamente la evaporación de la humedad de la tierra entre un 30 y un 40% y, por otro lado, la cobertura de vegetación supuestamente ha aumentado en un 85%, al tiempo que mejora significativamente el clima regional (Carrillo 2020). En el cuadro 5 se puede observar un resumen de las características los sistemas agrivoltaicos y los sistemas fotovoltaicos convencionales.

Cuadro 5

Características de los sistemas agrivoltaicos y sistemas fotovoltaicos.

Sistema	Características
Sistema Agrivoltaico	Alta inversión con la mayor velocidad de retorno Ideal para suministrar una red de energía eléctrica, aunque podría ser autónomo Posible solución a problemática mundial
Sistema fotovoltaico conectado a red	Alta inversión con retorno dependiendo de su uso Especial para sitios donde hay acceso a la red de energía eléctrica Solución para diferentes tipos de producciones
Sistema fotovoltaico autónomo	Alta inversión con retorno variable Especial para lugares sin acceso a la red de energía eléctrica Solución para producciones aisladas

Conclusiones

Los sistemas fotovoltaicos de bombeo requieren de una alta inversión inicial, sin embargo, el costo por ciclo de vida útil y litro de agua bombeado es menor a los demás sistemas de bombeo.

Existe una gran variedad de configuraciones para sistemas de bombeo fotovoltaico, sin embargo, no existe un sistema mejor que otro, sino que cada uno se debe diseñar de acuerdo con las necesidades y condiciones de cada lugar.

El desarrollo de esta tecnología ha ido en aumento durante los últimos años en todo el mundo, sin embargo, en la zona del Oriente Medio es donde hay una mayor cantidad de investigaciones y con las mejores tecnologías adaptadas para su zona.

En condiciones como las de Zamorano, donde existe la opción de conectarse a la red eléctrica, la mejor opción es diseñar sistemas de bombeo fotovoltaico conectados a la red.

Recomendaciones

Realizar estudios sobre el desempeño de los sistemas fotovoltaicos de bombeo, ya que en la literatura la información acerca de estos sistemas predomina en la parte oriental del mundo y carece en la parte occidental.

Evaluar la rentabilidad de la implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico conectado a la red en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Se recomienda la implementación de los sistemas fotovoltaicos de bombeo en las zonas donde la radiación solar no sea escasa durante un periodo largo de tiempo o el impacto de su ausencia eleve demasiado los costos.

Analizar el impacto de los sistemas fotovoltaicos en las zonas socialmente vulnerables o de riesgo.

Referencias

- Abella M, Romero F. 2005. Sistemas de bombeo fotovoltaico [Tesis de Maestría]. España: Escuela de Organización Industrial, Departamento de Energías Renovables; [consultado el 10 de ene. de 2021]. <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45332.pdf?width=800&height=400&inline=true>.
- Adeh EH, Good SP, Calaf M, Higgins CW. 2019. Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. *Sci Rep.* 9(1):11442. eng. doi:10.1038/s41598-019-47803-3.
- Aguilera J, Hontoria L. 2008. Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos [Tesis de Maestría]. España: Universidad de Jaen, Departamento de Electronica; [consultado el 18 de ene. de 2021]. <https://manuelberaun.files.wordpress.com/2011/12/dimensionado-de-sfv-autonomos.pdf>.
- Anis WR, Nour MA. 1994. Optimum design of a photovoltaic powered pumping system. *Energy Conversion and Management.* 35(12):1123–1130. doi:10.1016/0196-8904(94)90016-7.
- Asmat C. 2018. Determinación de la eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico en el distrito de Yaurisque – Cusco [Tesis]. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola; [consultado el 14 de jun. de 2021]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/13952>.
- Badescu V. 2003. Time dependent model of a complex PV water pumping system. *Renewable Energy.* 28(4):543–560. doi:10.1016/S0960-1481(02)00069-1.
- Bakelli Y, Hadj Arab A, Azoui B. 2011. Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept. *Solar Energy.* 85(2):288–294. doi:10.1016/j.solener.2010.11.023.
- Benghanem M, Daffallah KO, Alamri SN, Joraid AA. 2014. Effect of pumping head on solar water pumping system. *Energy Conversion and Management.* 77(6):334–339. doi:10.1016/j.enconman.2013.09.043.

- Benlarbi K, Mokrani L, Nait-Said MS. 2004. A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system. *Solar Energy*. 77(2):203–216. doi:10.1016/j.solener.2004.03.025.
- Bouzidi B. 2013. New sizing method of PV water pumping systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 4(1):1–10. doi:10.1016/j.seta.2013.08.004.
- Cáceres M, Vera LH, Firman A, Leiva G, Luque L, Busso A. 2013. Sistemas fotovoltaicos conectados a red: estabilidad en los parámetros de la red y sus efectos en la capacidad de generación. *Revista Brasileira de Energia Solar*; [consultado el 7 de ene. de 2021]. 4(1):47–54. <https://cutt.ly/umSh2tE>.
- Campana PE, Zhu Y, Brugiati E, Li H, Yan J. 2014. PV Water Pumping for Irrigation Equipped with a Novel Control System for Water Savings. *Energy Procedia*. 61:949–952. doi:10.1016/j.egypro.2014.11.1002.
- Carrillo M. 2020. Arándanos se cultivan bajo gigantes sistemas agrivoltaicos. [sin lugar]: [sin editorial] ; [consultado el 1 de jul. de 2021]. <https://cutt.ly/8Qrdn9s>.
- Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones. 2002. *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones. ISBN: 978-84-935049-6-0; [consultado el 7 de jun. de 2021].
- Daud A-K, Mahmoud MM. 2005. Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests. *Renewable Energy*. 30(5):701–714. doi:10.1016/j.renene.2004.02.016.
- Decreto No. 138-2013 (2013).
- Del Carpio-Huayllas TE, Ramos DS, Vasquez-Arnez RL. 2012 - 2012. Feed-in and net metering tariffs: An assessment for their application on microgrid systems. En: 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA). 2012 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America; 2/9/2012 - 4/9/2012; Montevideo. [sin lugar]: IEEE. p. 1–6.

- Delucchi MA, Jacobson MZ. 2011. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy*. 39(3):1170–1190. doi:10.1016/j.enpol.2010.11.045.
- Ebaid MSY, Qandil H, Hammad M. 2013. A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer. *Energy Conversion and Management*. 75:780–795. doi:10.1016/j.enconman.2013.07.083.
- Ecologistas en Acción. 2007. *Fotovoltaica Impacto Ambiental*. [sin lugar]: Ecologistas en Acción; [actualizado el 21 de jul. de 2007; consultado el 20 de jul. de 2021]. <https://www.ecologistasenaccion.org/10057/impacto-ambiental/>.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2001. *El papel de la agricultura en el desarrollo de los países MA y su integración en la economía mundial*. Roma: [sin editorial]; [consultado el 4 de ene. de 2021]. <http://www.fao.org/3/Y0491s/y0491s00.htm>.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2012. *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma, Italia: [sin editorial]; [consultado el 1 de ene. de 2021]. <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2018. *The benefits and risks of solar-powered irrigation- a global overview*. [sin lugar]: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN: 978-92-5-130479-2; [consultado el 20 de jul. de 2021]. <http://www.fao.org/3/i9047en/I9047EN.pdf>.
- Fernández Barrera M. 2015. *Energía solar: electricidad fotovoltaica*. Madrid: Liberfactory. ISBN: 978-84-9949-023-6; [consultado el 7 de jun. de 2021]. <https://cutt.ly/0mSjmc>.
- García Z. 2006. *Agricultura, expansión del comercio y equidad de género*. Roma: FAO ; [consultado el 1 de ene. de 2021]. <http://www.fao.org/3/a0493s/a0493s00.htm>.

- García C, Dias Robaina A, Calgaro M. 2003. Selección de bombas para riego. Uruguay: INIA (Serie Técnica; vol. 132). ISBN: 9974-38-173-8; [consultado el 27 de jun. de 2021]. https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-04-19_08-32-36119932.pdf.
- Glasnovic Z, Margeta J. 2007. A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Solar Energy*. 81(7):904–916. doi:10.1016/j.solener.2006.11.003.
- Goetzberger A, Zastrow A. 1982. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*. 1(1):55–69. doi:10.1080/01425918208909875.
- Good SP, Moore GW, Miralles DG. 2017. A mesic maximum in biological water use demarcates biome sensitivity to aridity shifts. *Nat Ecol Evol*. 1(12):1883–1888. eng. doi:10.1038/s41559-017-0371-8.
- Hamidat A, Benyoucef B. 2008. Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems. *Renewable Energy*. 33(5):933–942. doi:10.1016/j.renene.2007.06.023.
- IBERDROLA. 2021. Energía agrovoltáica, cuando la agricultura y las renovables se dan la mano. [sin lugar]: [sin editorial]; [consultado el 21 de jun. de 2021]. <https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltáica>.
- [IEA] International Energy Agency. 2020. Snapshot of global PV markets. [sin lugar]: International Energy Agency (Report; 1-37). ISBN: 978-3-906042-94-7; [consultado el 19 de ene. de 2021]. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf.
- [IICA] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 2014. Uso y acceso a las energías renovables en territorios rurales: Guía Metodológica. San José, Costa Rica: IICA. ISBN: 978-92-9248-548-1; [consultado el 10 de jun. de 2021]. <http://repiica.iica.int/B3661e/B3661e.pdf>.
- Khatib T, Mohamed A, Sopian K. 2013. A review of photovoltaic systems size optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 22(4):454–465. doi:10.1016/j.rser.2013.02.023.

- Kumar S, Kumar S. 2020. Solar PV powered water pumping system using DC motor drive: A Critical Review. *International Journal of Technical Research & Science*; [consultado el 11 de jun. de 2021]. 5(4):1–8. <https://cutt.ly/7QrdZ9o>.
- Lamigueiro O. 2012. *Energía Solar Fotovoltaica*. 5ª ed. [sin lugar]: Creative Commons (vol. 1.5); [consultado el 21 de feb. de 2021]. https://procomun.files.wordpress.com/2012/01/esf_operpinanene2012.pdf.
- Langridge D, Lawrance W, Wichert B. 1996. Development of a photo-voltaic pumping system using a brushless d.c. motor and helical rotor pump. *Solar Energy*. 56(2):151–160. doi:10.1016/0038-092X(95)00077-5.
- Ley 20571: Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales (2012 feb. 20).
- Lorente J. 2010. *Curso de fotoprotección [Publicacion universitaria]*. Barcelona: Universidad de Barcelona, Departamento de Astronomía y Meteorología; [consultado el 4 de jun. de 2021]. <https://cutt.ly/eQrd9gi>.
- Marigorta E, Suarez S, Francos J. 1994. *Sistemas de bombeo*. Gijón: [sin editorial]. ISBN: 84-604-9677-5; [consultado el 2 de ene. de 2021].
- Marín C. 2004. *La energía solar fotovoltaica en España*. Nimbus; [consultado el 28 de ene. de 2021]. (13-14):5–31. <http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/1443/espejomin.pdf?sequence=1>.
- Martínez Bogado M. 2004. *Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales [Tesis de Doctorado]*. Argentina: Universidad Nacional de General San Martín, Instituto de Tecnología; [consultado el 20 de jul. de 2021]. <http://www.tandar.cnea.gov.ar/doctorado/Tesis/MartinezBogado.pdf>.

- Metwally HMB, Anis WR. 1994. Performance analysis of photovoltaic-powered water-pumping systems using switched reluctance motor drives. *Journal of Power Sources*; [consultado el 12 de may. de 2021]. 52(1):141–147. doi:10.1016/0378-7753(94)01946-0.
- Metwally HMB, Anis WR. 1996. Dynamic performance of directly coupled photovoltaic water pumping system using D.C. shunt motor. *Energy Conversion and Management*. 37(9):1407–1416. doi:10.1016/0196-8904(95)00226-X.
- Montoya Rasero C. 2011. *Energía Solar Fotovoltaica*. España: Escuela de Organización Industrial; [consultado el 7 de jun. de 2021]. <https://static.eoi.es/savia/documents/componente75553.pdf>.
- Moreton R, Victoria M, Ramiro J. 2018. *Gráficos significativos energía solar fotovoltaica*. España: Universidad Politecnica de Madrid; [consultado el 8 de ene. de 2021]. https://www.ies.upm.es/sfs/IES/IES-UPM/Portada/2018_PV_Espa%C3%B1a.pdf.
- Odeh I, Yohanis YG, Norton B. 2006. Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance. *Solar Energy*. 80(1):51–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.07.009>. doi:10.1016/j.solener.2005.07.009.
- Ordoñez Bonilla JA. 2018. *Diseño y evaluación de sistemas de bombeo fotovoltaico para la pequeña agricultura*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.
- Ould-Amrouche S, Rekioua D, Hamidat A. 2010. Modelling photovoltaic water pumping systems and evaluation of their CO₂ emissions mitigation potential. *Applied Energy*. 87(11):3451–3459. doi:10.1016/j.apenergy.2010.05.021.
- Pande PC, Singh AK, Ansari S, Vyas SK, Dave BK. 2003. Design development and testing of a solar PV pump based drip system for orchards. *Renewable Energy*. 28(3):385–396. doi:10.1016/s0960-1481(02)00037-x.
- Pereira L, Juan Valero J de, Picornell M, Tarjuelo J. 2010. *El riego y sus tecnologías*. 1ª ed. Albaceta, España: CREA-UCLM. ISBN: 13:978-84-692-9979-1; [consultado el 30 de jun. de 2021].

- Poullikkas A. 2013. A comparative assessment of net metering and feed in tariff schemes for residential PV systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 3:1–8. doi:10.1016/j.seta.2013.04.001.
- Ramos JS, Ramos HM. 2009. Solar powered pumps to supply water for rural or isolated zones: A case study. *Energy for Sustainable Development*. 13(3):151–158. doi:10.1016/j.esd.2009.06.006.
- Reca J, Torrente C, López-Luque R, Martínez J. 2016. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. *Renewable Energy*. 85(1):1143–1154. doi:10.1016/j.renene.2015.07.056.
- Roca J. 23 de feb. de 2021. Agrivoltaica o cómo dar un uso más eficiente a la tierra agrícola. *El Periodico de la Energía*; [consultado el 20 de jun. de 2021]. <https://elperiodicodelaenergia.com/agrivoltaica-o-como-dar-un-uso-mas-eficiente-a-la-tierra-agricola/>.
- Ruiz D. 2021. Modelación energética de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para zonas rurales. Colombia: Universidad de la Costa, Facultad de Ingeniería; [consultado el 14 de jun. de 2021]. <https://cutt.ly/2QrgHpJ>.
- [SAG] Secretaria de Agricultura y Ganadería. 2010. Propuesta plan estratégico del sector agroalimentario de Honduras. [sin lugar]: Unidad de Planificación, Evaluación y Gestión ; [consultado el 26 de jun. de 2021]. <https://sag.gob.hn/dmsdocument/5139>.
- Sallem S, Chaabene M, Kamoun MBA. 2009. Energy management algorithm for an optimum control of a photovoltaic water pumping system. *Applied Energy*. 86(12):2671–2680. doi:10.1016/j.apenergy.2009.04.018.
- Solomon Y, Rao P, Tadesse T. feb. 2021. A Review on Solar Photovoltaic Powered Water Pumping System for off-Grid Rural Areas for Domestic use and Irrigation Purpose [Tesis de pregrado]. Nekemte, Ethiopia: Wollege University, College of Engineering and Technology; [consultado el 24 de mar. de 2021]. <https://cutt.ly/OQrg0It>.

- Sontake VC, Kalamkar VR. 2016. Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 59(3):1038–1067. doi:10.1016/j.rser.2016.01.021.
- Style O. 2012. *Energía Solar Autónoma: Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. Primera Edición. [sin lugar]: ITACA. ISBN: 978-84-615-7887-0; [consultado el 2 de feb. de 2021].
- Terki A, Moussi A, Betka A, Terki N. 2012. An improved efficiency of fuzzy logic control of PMBLDC for PV pumping system. *Applied Mathematical Modelling*. 36(3):934–944. doi:10.1016/j.apm.2011.07.042.
- Universidad de Castilla - La Mancha. 2009. Eficiencia energética en instalaciones de riego. España; [consultado el 30 de jun. de 2021]. <http://crea.uclm.es/siar/publicaciones/files/HOJA17.pdf>.
- Verma S, Mishra S, Chowdhury S, Gaur A, Mohapatra S, Soni A, Verma P. 2020. Solar PV powered water pumping system – A review. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2020.09.434.
- Vick BD, Clark RN. 2011. Experimental investigation of solar powered diaphragm and helical pumps. *Solar Energy*. 85(5):945–954. doi:10.1016/j.solener.2011.02.011.
- Wang H, Moreda Cantero GP, Muñoz-García M-Á, Molina López I. 2019 - 2019. Simulación del uso compartido del terreno agrícola por paneles solares fotovoltaicos y cultivo. En: Martín Ramos P, García Ramos FJ, editores. *Congreso Ibérico de Agroingeniería. X Congreso Ibérico de Agroingeniería = X Congresso Ibérico de Agroengenharia*; 2/9/2019 - 5/9/2019; Huesca, Spain. Zaragoza: Servicio de Publicaciones Universidad. p. 218–224.