

## ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO

### STATE OF THE ART IN SOLAR PHOTOVOLTAIC WATER PUMPING SYSTEM

MSc. (c). Jairo Iván Flórez Barrera\*, PhD. Carlos Lizardo Corzo Ruiz\*\*

#### \*Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y arquitectura, Maestría en Controles Industriales.  
Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: (57+7) 5685303, Fax: (57+7) 5685303, Ext. 144.  
E-mail: jairo.ivan.florez@gmail.com.

#### \*\*Unidades Tecnológicas de Santander

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Programa de Ingeniería Electrónica  
Calle de los Estudiantes #9-82 Ciudadela Real de Minas-Bucaramanga, Santander, Colombia.  
Conmutador: 6917700 Ext. 1120 – Fax: 6917691 Línea gratuita: 018000 940203  
E-mail: ccorzo@correo.uts.edu.co

**Resumen:** el agua y la energía siguen siendo necesidades que se presentan en sectores rurales aislados, desconectados de la red eléctrica, en donde el agua es suministrada desde alguna fuente superficial o subterránea, mediante motobombas contaminantes movidas por algún motor de combustión. El agua, además de ser necesaria para el consumo humano, también resulta fundamental en la mejora de la producción agrícola con la implementación de sistemas de riego y en la producción ganadera y pecuaria en general. Ante esta situación, las fuentes renovables juegan un papel importante en el desarrollo de sistemas de bombeo sostenibles. En este artículo se presenta una revisión acerca de los sistemas bombeo solar fotovoltaico (*Solar Photovoltaic Water Pumping Systems - SPVWPS*). Se inicia con una descripción de las topologías utilizadas, bombas, componentes y controladores para la obtención de la máxima potencia (MPPT) de los paneles solares. También se presenta detalladamente, resultados de estudios de evaluación del desempeño, económicos y de eficiencia energética en este tipo de sistemas.

**Palabras clave:** *Bombeo Solar, MPPT, Convertidores DC/DC*

**Abstract:** water and energy are still needs in isolated rural sectors because these places are disconnected from the electricity grid and water is supplied from a superficial or underground source, by means of polluting pumps driven by combustion engines. Water, besides being necessary for human consumption, is also fundamental in the improvement of agricultural production and livestock thanks to the implementation of irrigation systems. In that context, renewable sources play an important role in the development of sustainable pumping systems. This article presents a review about Solar Photovoltaic Water Pump Systems (SPVWPS). It starts with a description of the topologies used, pumps, components and controllers for obtaining the maximum power (MPPT) of the solar panels. It also presents in detail the results of studies oriented to evaluate performance, economy and energy efficiency in this type of systems.

**Keywords:** *Solar pumping, MPPT, DC/DC Converters*

## 1. INTRODUCCIÓN

El bombeo de agua a nivel mundial depende generalmente de la energía eléctrica convencional o de generadores de electricidad a diésel, gas propano o carbón. Además de generar costos de operación permanente, producen ruido y polución, que pueden minimizarse mediante sistemas de bombeo solar fotovoltaico (SPVWPS) (Foster *et al.*, 2009).

Ahora bien, el bombeo solar fotovoltaico encuentra un gran atractivo en zonas rurales apartadas de la red eléctrica, en donde un diseño adecuado del sistema fotovoltaico puede resultar en un significativo ahorro a largo plazo en comparación con el sistema de bombeo convencional. Además, pueden utilizarse tanques para ahorrarse el uso de baterías para el almacenamiento de la energía. (Rohit *et al.*, 2013). Lo anterior, ubica a los SPVWPS como un agente de competitividad para el sector rural, dado que el agua requerida para mejorar la producción agrícola (riego) y pecuaria (consumo animal) podría resultar con el tiempo más económica que la extraída con un sistema de bombeo convencional.

En este artículo se presenta un estado del arte de los sistemas de bombeo solar fotovoltaico SPVWPS. Se inicia con una presentación general de este tipo de sistemas, se continúa con una revisión detallada de los elementos que componen este tipo de sistemas, luego se presentan una serie de estudios sobre el desempeño de este tipo de sistemas para finalizar con estudios relacionados con la factibilidad económica de la implementación de los SPVWPS:

## 2. SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICOS

Un sistema solar fotovoltaico para el bombeo de agua (SPVWPS) (Fig. 1), consiste de: i) Un arreglo de paneles fotovoltaicos como fuente de energía del sistema, con una potencia entre 200 y 5000Wp en chapa. ii) Una motobomba que podría tener una potencia entre 0.2 a 5 HP o 150 y 3700 W. La bomba puede ser AC o DC para montaje en superficie, sumergible o flotante. iii) Controladores electrónicos que permitan operar en el punto de máxima potencia (MPPT), de tal forma que se maximice la extracción de potencia del panel fotovoltaico y su vez se entrega la mayor potencia posible a la bomba. iv) Dispositivos de almacenamiento ya sea de energía eléctrica por medio de baterías o de agua en tanques, para que el

sistema opere y preste su servicio en horas nocturnas o en temporadas de poca radiación. v) Estructuras para el montaje de los paneles, que permitan ajustar el ángulo de inclinación del panel con respecto a la horizontal y maximizar la potencia suministrada. La orientación de los paneles en estas estructuras puede ser fija o de variación automática. vi) Cables de interconexión eléctrica y tubos para el circuito hidráulico, además de algún tipo de botón de encendido (Charutha, 2015).

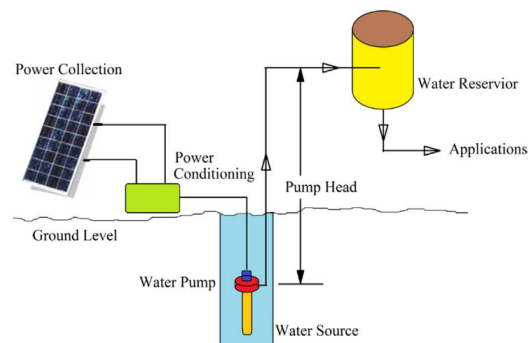


Fig. 1. Esquema general de un sistema de bombeo solar (Aliyu *et al.*, 2018).

## 3. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICOS

A continuación, se describe con mayor detalle los componentes que requeridos para la implementación de un SPVWPS.

### 3.1 Panel solar fotovoltaico

El fenómeno fotovoltaico convierte la energía de la luz solar presente en los fotones en electricidad; esta se genera cuando los fotones impactan sobre la célula fotovoltaica y son absorbidos por su material produciéndose electrones libres. Los fotones elevan el nivel de energía de la célula y producen una diferencia de potencial generándose una tensión eléctrica en el circuito (Pannase y Nanavala, 2017). La célula fotovoltaica se fabrica mayoritariamente de Silicio y este puede ser monocristalino, policristalino o cristales de Silicio amorfo. Una célula fotovoltaica individual puede generar pequeñas cantidades de energía eléctrica, entre 1W y 3W con una tensión menor a 1V. Comercialmente los módulos constan de 36 células de silicio cristalino conectados en serie y cuanto más área tenga el módulo mayor será su potencia y corriente disponible (Mejia *et al.*, 2014).

El parámetro más importante en un panel solar fotovoltaico es la Potencia Máxima, dado que es de

esta manera que se reconoce un panel. Además de este se tienen parámetros como el Voltaje de circuito abierto, la Corriente de corto circuito y el punto de máxima potencia MPP. Este último es el punto de operación en el cual el panel puede suministrar la potencia máxima ante una condición climática dada. (Cepeda y Sierra, 2016)

Algo muy importante en los paneles solares son las curvas de corriente y potencia vs tensión, (Fig. 2), ante diferentes valores de los parámetros radiación y temperatura, (Fig. 3) y (Fig. 4). El trazado de estas curvas describe el comportamiento del panel, el cual es soportado rigurosamente por modelos teóricos relativamente complejos y no lineales (A. K. Gupta y Saxena, 2016).

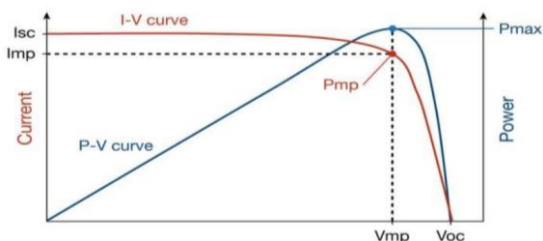


Fig. 2. Curva característica de corriente y potencia vs tensión de un panel fotovoltaico (A. K. Gupta y Saxena, 2016).

En términos generales se puede observar que existe una relación directa entre la potencia del panel y el nivel de radiación. En cuanto la temperatura se aprecia una relación inversa, es decir, a mayor temperatura menor potencia. De esto se puede concluir, que la temperatura es un parámetro a atender y si es posible controlar, para mejorar el desempeño y eficiencia del panel. En este sentido la Universidad Industrial de Santander recientemente recibió la patente por un sistema de enfriamiento de paneles solares mediante el bombeo permanente de agua sobre la superficie del panel, en el marco de la construcción de un techo verde (Ordóñez Plata, et al., 2018).

### 3.2 Tipos de Bombas

Las bombas en un SPVWPS pueden clasificarse de acuerdo a la localización requerida con respecto al nivel del agua; esto es, sumergibles, de superficie o flotantes. Una bomba sumergible suministra el agua desde un pozo profundo mientras que una bomba de superficie suministra el agua desde pozos poco profundos, fuentes, estanques, ríos y tanques; finalmente las bombas flotantes se utilizan para extraer el agua de reservorios y estanques con la habilidad de ajustarse a los cambios en altura del fluido (Chandel et al., 2015).

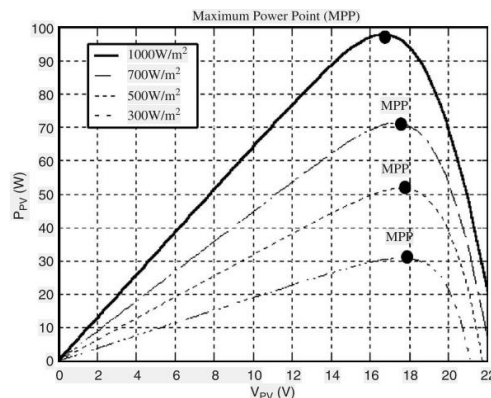


Fig. 3. Curvas de potencia vs Tensión con radiación variable. (Salas et al., 2006)

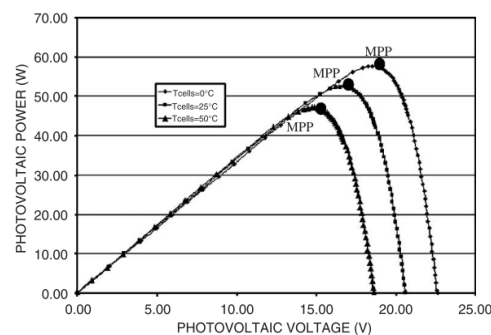


Fig. 4. Curvas de potencia vs tensión con temperatura variable (Salas et al., 2006)

#### 3.2.1 Bombas de montaje superficial

Las bombas de montaje superficial pueden ser AC o DC, se localizan cerca de la superficie del agua y por lo general se utilizan para desplazar el agua a través de una tubería (Fig. 5). Algunas de estas bombas pueden desarrollar una considerable altura de bombeo -cabeza- y resultan adecuadas para mover agua a largas distancias o elevaciones. Estas bombas generalmente son descartadas en el diseño debido a sus limitaciones de succión cuando es utilizada en pozos profundos y comparada con las bombas sumergibles. La succión típica de una bomba de superficie solar está entre 3 y 6 m. Las bombas superficiales tienen una mayor exposición a los factores climáticos, haciendo que esta sea más vulnerable a situaciones climáticas adversas. Esta bomba presenta mayor tasa de problemas mecánicos y fallas causadas por la dinámica del pozo durante la extracción. La pérdida del fluido de carga en las bombas superficiales puede llevar a la quema del motor, requiriéndose su reemplazo. Otro problema de las bombas de superficie es la cavitación. Una de sus mayores desventajas es la baja eficiencia debido a las pérdidas de potencia en

la caja de rodamientos y los altos costos de mantenimiento. (Sontake *et al.*, 2016).

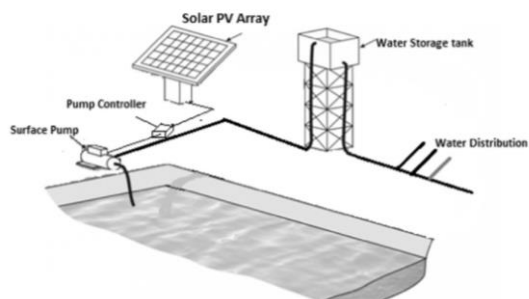


Fig. 5. SPVWPS con bomba de montaje superficial (Sontake *et al.*, 2016)

### 3.2.3 Bombas Flotantes.

La versatilidad de las bombas flotantes (Fig. 6), la hace ideal para aplicaciones de irrigación a partir de canales o pozos abiertos. En SPVWPS, este tipo de bombas son portátiles y resultan muy útiles al momento de irrigar en días muy secos. La mayoría de este tipo de bombas utiliza una sencilla bomba centrífuga. La mayoría de este tipo son motores DC sin escobillas y electrónicamente conmutados. Por lo general, los paneles solares fotovoltaicos que se ofrecen con este tipo de bombas, incorporan un sistema de “carretilla” que facilita su transporte (Sontake *et al.*, 2016).

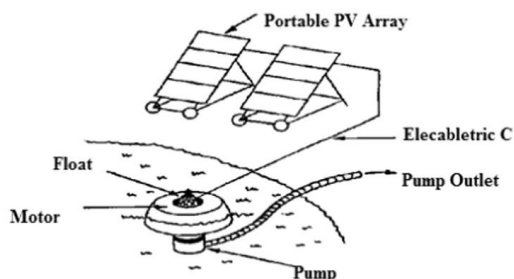


Fig. 6. Esquema de un SPVWPS con bomba flotante (Sontake *et al.*, 2016)

### 3.2.3 Bombas sumergibles.

Las bombas sumergibles están diseñadas para trabajar debajo de la superficie de la tierra. Las bombas sumergibles no trabajan al menos que esté completamente sumergida dentro de un líquido. A diferencia de las bombas de superficie, que succionan el agua hacia la superficie, las bombas sumergibles están diseñadas para empujar el agua hacia la superficie. Una bomba sumergible típica tiene de 60 a 120 cm de largo y entre 7 y 12 cm de diámetro. La bomba consiste de un motor que se

encuentra herméticamente sellado y que esta acoplado al cuerpo de la bomba. El motor mueve el propulsor, el cual está montado sobre su eje. El resto de la bomba consiste en un cable para conectar el motor y una tubería que transporta el agua a la superficie y la deposita en el tanque de almacenamiento. Este tipo de motobomba es la más utilizada en sistemas de bombeo solares fotovoltaicos tanto en el área urbana como rural. Las ventajas de esta configuración son la fácil instalación, el ser compatible casi siempre con tuberías flexibles y al ser sumergida en lo profundo del agua se previenen daños potenciales. Funcionan con motores AC y DC. Las bombas sumergibles se encuentran mas protegidas de la inclemencia del clima y usan el agua subterránea como su principal fluido. La mayoría de las bombas sumergibles, que son diseñadas específicamente para ser conectadas a energía solar, presentan una eficiencia entre el 40 y 70% (Sontake *et al.*, 2016)

### 3.3 Baterías

En el mercado de los sistemas fotovoltaicos aislados las baterías recargables comerciales se pueden clasificar en: Plomo-Ácido o (Pb-S), Níquel-Cadmio o (NiCad), Níquel-Hidruro de Metal o (NiMH), y Litio-Ion o (Li-ion). Las Baterías de ácido son las más populares, y son ampliamente utilizadas en sistemas de energía renovables, son económicas, medianamente durables, pero son altamente contaminantes. (Zahab *et al.*, 2016)

El modelo circuital que caracteriza el comportamiento dinámico de una batería recargable, tal como se aprecia en la (Fig. 7), está representado por una fuente controlada de tensión en serie con una resistencia constante y se describe por las ecuaciones (1) y (2). Donde  $E$  es la tensión de no carga (V),  $E_0$  es la constante de tensión de batería 12V,  $K$  es la tensión de polarización (V),  $Q$  es la capacidad de la batería (Ah),  $\int idt$  es la carga actual de batería (Ah),  $A$  es la amplitud de la zona exponencial (V),  $B$  es la constante de tiempo de la zona exponencial inversa (Ah)<sup>-1</sup>,  $V_{bat}$  es la tensión de la batería (V),  $R$  es la resistencia interna (Ohm),  $i$  es la corriente de la batería. (Tremblay *et al.*, 2007)

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int idt} + A \exp \left( -B \int idt \right) \quad (1)$$

$$V_{bat.} = E - i * R \quad (2)$$

En el caso de los sistemas de bombeo solar fotovoltaico, se encuentran trabajos e implementaciones sin baterías (Malla *et al.*, 2011), con alta eficiencia en aplicaciones como el riego o el suministro humano (Parvathy S. y Vivek A., 2015).

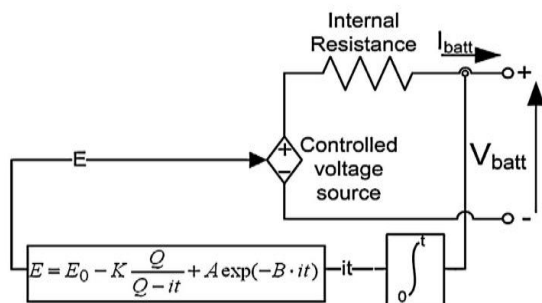


Fig. 7. Modelo circuital de una batería recargable (Tremblay *et al.*, 2007)

### 3.4 Convertidores DC/DC

Los SPVWPS, como cualquier otro sistema que obtenga su potencia a partir de un arreglo de paneles fotovoltaicos requieren de controladores que velen por la operación del sistema punto de máxima potencia, punto que varía de acuerdo a las condiciones climáticas, la radiación y temperatura a la que esté operando el panel.

Shabaan *et al.*, (2018) demuestra que con la implementación de un controlador MPPT de inferencia neuro difusa adaptiva ANFIS incrementa la salida de potencia del panel fotovoltaico del 20.1% al 82.7% el cual abastece una bomba centrífuga.

El controlador MPPT tradicionalmente está compuesto del convertidor DC/DC, el algoritmo de control de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT y si el sistema lo requiere, el cargador de baterías y un inversor si el actuador de la bomba corresponde con un motor AC (Anoop y Reema, 2017)

Dentro de los convertidores se encuentran varias topologías entre las que están, convertidor Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, SEPIC y ZETA (J. Enrique, 2011). Estos circuitos electrónicos de potencia convierten un determinado nivel de tensión continua en otro nivel de continua y normalmente suministran una salida regulada. La salida DC en estos circuitos se controla ajustando el ciclo de trabajo  $\delta$  de un dispositivo electrónico conmutable MOSFET o IGBT.

#### 3.4.1. Convertidor Buck (Reductor)

El convertidor Buck suministra una tensión de salida menor que la tensión de entrada (Fig. 8). Durante el tiempo en el que el interruptor conduce, la fuente entrega energía a la carga y a los componentes del filtro pasa bajas LC. Después, en el tiempo de no-conducción del interruptor, la corriente del inductor  $L$  transita libremente por el diodo, entregando parte de su energía a la carga. (Enrique, 2011).

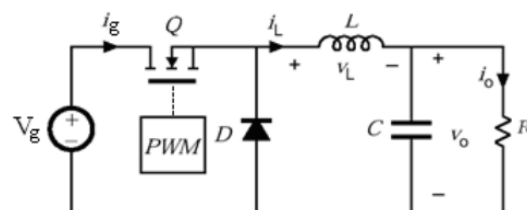


Fig. 8. Topología convertidor Buck (Kazimierczuk, 2012)

Aashoor y Robinson (2014) y Andoulssi *et al.* (2013), presentan desarrollos de sistemas de bombeo fotovoltaico que hacen uso del convertidor Buck. En ambos casos las respuestas dinámicas del sistema ofrecen buen desempeño y alta eficiencia en comparación con acoples directos entre panel fotovoltaico y la bomba.

#### 3.4.2. Convertidor Boost (Elevador)

El convertidor Boost logra una tensión de salida mayor que la tensión de alimentación, (Fig. 9). En el tiempo de conducción del interruptor, el diodo queda polarizado inversamente y aísla la etapa de entrada de la etapa de salida. La energía generada por la fuente es acumulada en el inductor. Luego, en el tiempo de no conducción del interruptor, el inductor y la fuente suministran la energía a la salida (Enrique, 2011).

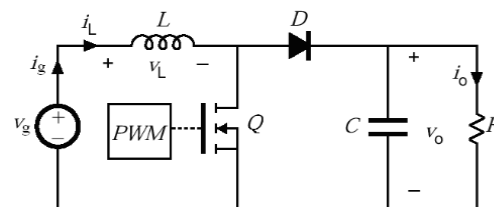


Fig. 9. Topología convertidor Boost (Kazimierczuk, 2012)

Singh y Kumar (2016), presentan un sistema de bombeo solar fotovoltaico con un motor DC sin escobillas acoplado a la bomba. En este caso se



utilizó un convertidor Boost. La razón de la elección de este convertidor se debe a su alta eficiencia, el bajo número de componentes que tiene, y la muy buena eliminación del rizado de entrada. Acevedo *et al.*,(2018) logran un 96% de eficiencia en su implementación.

### 3.4.3. Convertidor Buck-Boost

El convertidor Buck-Boost (Fig. 10), entrega una tensión de salida mayor o menor que la de entrada, con polaridad negativa con respecto a la referencia de entrada. Durante el tiempo de en el que el interruptor se cierra, la fuente entrega energía al inductor y la almacena, entre tanto, el diodo queda polarizado inversamente aislando la salida del convertidor. Cuando el interruptor se abre, el diodo queda polarizado directamente y la energía acumulada en el inductor es entregada a la etapa de salida (Enrique, 2011).

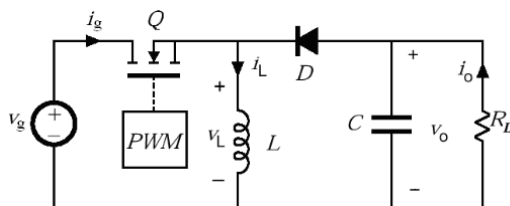


Fig. 10 Topología de convertidor Buck – Boost (Kazimierczuk, 2012)

Enrique *et al.* (2007), realiza un estudio teórico comparativo entre varios convertidores, Buck, Boost y Buck – Boost y encuentra que un sistema fotovoltaico de acuerdo al convertidor elegido se pueden presentar limitaciones en el desempeño. Del estudio se concluye que un convertidor Buck-Boost es la única de las tres que puede seguir el punto de máxima potencia a pesar de los cambios en temperatura, radiación y carga conectada ver Tabla 1, además, recomienda, como una buena práctica, utilizar un convertidor Buck-Boost en la instalaciones fotovoltaicas. En sistemas de bombeo los convertidores Buck-Boost son ampliamente usados como se puede observar en los trabajos de Kalasathya (2016), Mishra (2018) y Kappali (2013)

Tabla 1. Eficiencia del seguimiento del punto de máxima potencia con diferentes cargas.

Load	Without converter (%)	Buck converter (%)	Boost converter (%)	Buck-boost converter (%)
$R_L = 5 \Omega$	88.5	97.2	91.2	99.9
$R_L = 20 \Omega$	40.2	40.3	99.7	99.9

### 3.4.4. Convertidor Cuk

El convertidor Cuk (Fig. 11), al igual que el convertidor Buck - Boost, presenta una tensión mayor o menor a la salida en comparación con la tensión de entrada, y con polaridad negativa con respecto a la referencia. En el tiempo en el que el interruptor se cierra, la fuente entrega energía al inductor  $L_1$ ; por su parte, el inductor  $L_2$  acumula energía entregada por el condensador  $V_{C1}$ , la cual, a su vez, polariza el diodo en la región inversa. Las corrientes de los inductores  $i_{L1}$  e  $i_{L2}$  circulan a través del interruptor. Durante la apertura del interruptor,  $i_{L1}$  e  $i_{L2}$  circulan a través del diodo en sentido. En esta topología la entrega de energía entre la fuente y la salida se realiza a través del condensador  $C_1$ . La ventaja de este convertidor se resalta en que la corriente generada en la fuente es continua a causa de la conexión en serie de  $L_1$  y  $V_g$ .(J. Enrique, 2011)

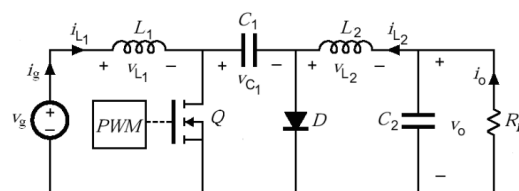


Fig. 11. Topología convertidor Cuk (Kazimierczuk, 2012)

Gupta y Jain (2013), en su trabajo seleccionan el convertidor Cuk debido a las bajas pérdidas de conmutación que presenta, así como la alta eficiencia entre los convertidores no aislados. También, destacan la capacidad de corriente que puede suministrar debido al inductor que presenta la etapa de salida.

### 3.4.5. Convertidor SEPIC

El convertidor SEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter), al igual que los convertidores Buck – Boost y Cuk, tiene la posibilidad de entregar una tensión de salida mayor o menor que la tensión de entrada, pero sin invertir la tensión de salida con respecto a la referencia (Fig. 12). Cuando el interruptor conduce, la fuente  $V$  entrega energía al inductor  $L_1$ , y el condensador  $C_1$  le entrega energía al inductor  $L_2$ . En ese mismo tiempo, el diodo está polarizado inversamente por la relación de tensiones de  $C_1$  y  $C_2$ . Las corrientes  $i_{L1}$  e  $i_{L2}$  pasan por el interruptor. Cuando el interruptor se abre, la energía almacenada en  $L_1$  y  $L_2$  es suministrada hacia la salida.

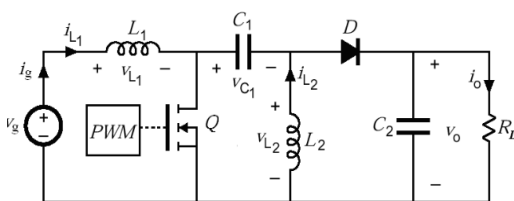


Fig. 12 Topología del convertidor SEPIC (Kazimierczuk, 2012)

Gali y Amrutha (2016), propusieron un convertidor SEPIC para el desarrollo de un sistema el bombeo fotovoltaico. Manifiestan que la ventaja de este convertidor es la reducción del rizo a la salida, lo cual da mayor vida útil al motor. Los principales resultados de esta investigación se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Desempeño de un convertidor SEPIC en un sistema de bombeo (Gali y Amrutha, 2016)

Nivel de radiación en el panel	Velocidad del motor con SEPIC	Velocidad del motor sin SEPIC	% rizado	
			Con SEPIC	Sin SEPIC
1000W/m <sup>2</sup>	1700 rpm	1700 rpm	0	0
700W/m <sup>2</sup>	1550 rpm	1200 rpm	3%	25%
500W/m <sup>2</sup>	1400 rpm	1000 rpm	6%	33.3%

### 3.4.6. Convertidor ZETA

El convertidor ZETA (Fig. 13), es similar al SEPIC, dado que permite entregar niveles de tensión mayores o menores que la tensión de entrada y además no invierte la polaridad de la señal de salida. La diferencia entre ambas topologías radica en la posición de los componentes y que en el convertidor ZETA existe una discontinuidad de la corriente de entrada suministrada por la fuente dado que está conectada en serie con el interruptor. Cuando el interruptor está cerrado, la fuente entrega energía a los inductores  $L_1$ ,  $L_2$  y a la salida. En este periodo la polarización del diodo es inversa a causa de la tensión de la fuente y del condensador  $C_1$ . Las corrientes  $i_{L1}$  e  $i_{L2}$  pasan a través del interruptor. Durante la apertura del interruptor, la energía acumulada en  $L_1$  se libera a través del condensador  $C_1$  y la energía del inductor  $L_2$  sobre la carga, a través del diodo

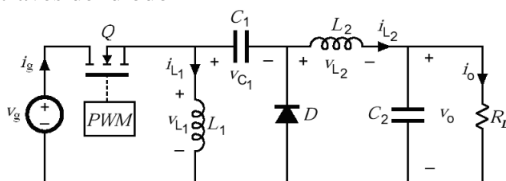


Fig. 13 Topología de convertidor ZETA (Kazimierczuk, 2012)

Nandini y Daniel (2017), modelan un controlador para un motor BLDC en un Sistema de bombeo solar fotovoltaico en Matlab. En este trabajo se selecciona un convertido ZETA por las siguientes características: i) presenta una salida regula en un amplio rango de entradas, ii) tiene una rápida respuesta en comparación de otros convertidores, iii) su circuito es simple, iv) sigue un amplio rango de potencias, v) tiene poco rizo a la salida y vi) no requiere protección para sobre corriente.

### 3.5 Algoritmos MPPT

Los algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia MPPT, son los encargados de ajustar el ciclo útil de la señal PWM del controlador DC/DC. Existen algoritmos sencillos de tradición como el método de perturbación y observación (P&O) o el de conductancia incremental (IC) y otros basados en técnicas de control de inteligente como el control difuso, los algoritmos genéticos y las redes neuronales.(Shweta Pandey y Jema Prasanta, 2017).

Yahyaoui *et al.* (2015) comparan el desempeño de los algoritmos P&O, IC y Fuzzy en sistema de bombeo solar. Esto lo realizan a través de simulación en PSIM. En el estudio se utiliza un convertidor Buck. Los resultados dejan ver que el algoritmo P&O es el método que más rápido encuentra el punto MPPT y de mejor desempeño a pesar de presentar algunas oscilaciones en la corriente, tensión y potencia. Como criterio para medir el desempeño utilizan el Error medio normalizado y el error cuadrático medio normalizado (NMBE) y (NRMSE)

## 4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICOS

La principal desventaja de los sistemas de bombeo solar fotovoltaico radica en un bajo desempeño y una baja eficiencia energética (Li *et al.*, 2017). Por consiguiente, en el estado del arte se encuentran estudios con resultados que apuntan al mejoramiento de estos dos aspectos, ya sea mediante la implementación de prototipos de prueba o simulaciones.

Gouws y Lukhwareniet (2012), presentan los factores que influyen en el desempeño y eficiencia de los sistemas de bombeo solar fotovoltaico con un enfoque en Sudáfrica. Los principales factores que se discuten son: i) las condiciones ambientales, ii) los paneles fotovoltaicos, iii) controladores, iv)

almacenadores de energía, v) convertidores e inversores, y vi) bombas y motores. En la (Fig. 14), se desagregan las variables a tener en cuenta en cada uno de los factores mencionados.

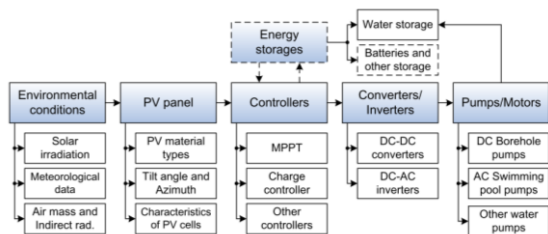


Fig. 14. Factores que influyen en el desempeño y eficiencia de un SPVWPS (Gouws y Lukhwareni, 2012)

Ba *et al.* (2018), determina el desempeño de un sistema de bombeo solar fotovoltaico mediante su modelado y simulación en Simulink de Matlab. El sistema consiste de un generador fotovoltaico, un convertidor DC/DC tipo buck, un controlador MPPT con el algoritmo de P&O y una bomba centrífuga acoplada a un motor de continua de imanes permanentes PMDC. El sistema alcanza una máxima eficiencia del 20%. De la (Fig. 15) a la (Fig. 17), se observan las curvas de eficiencia del controlador MPPT, el motor y todas las eficiencias calculadas en el sistema.

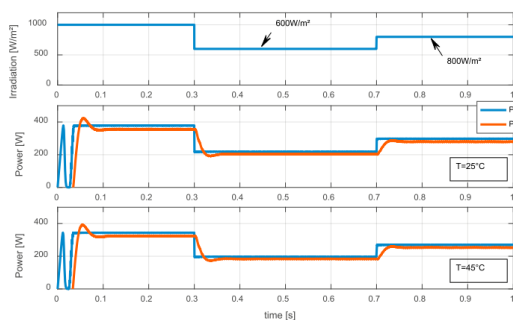


Fig. 15. Desempeño del controlador MPPT con el método P&O y el convertidor de potencia DC/DC (Ba *et al.*, 2018)

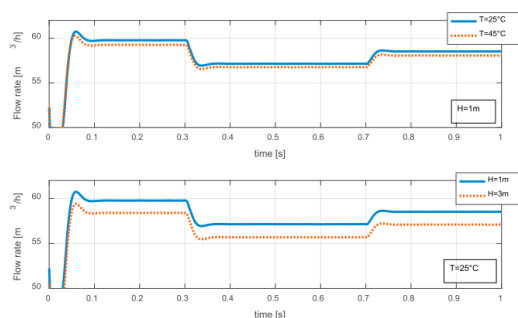


Fig. 16. Desempeño de la motobomba (Ba *et al.*, 2018)

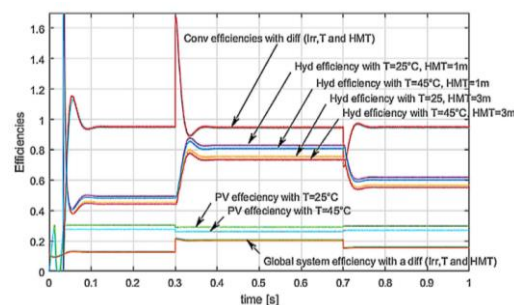


Fig. 17. Eficiencia global del sistema (Ba *et al.*, 2018)

Harrag *et al.* (2017) evalúa el desempeño de un sistema de bombeo solar fotovoltaico sin y con el controlador MPPT. El actuador de la motobomba corresponde a un PMDC. Los resultados indican que la presencia del controlador MPPT mejoran el desempeño estático y dinámico del sistema, en términos de precisión, rapidez de seguimiento del punto de operación, disminución del rizado y overshoot. En la Tabla 3, se observan los resultados estáticos comparativos del acople directo e indirecto de la bomba al panel fotovoltaico del estudio ante diferentes valores de radiación. En la gran mayoría de los casos, el desempeño se duplica con la presencia del controlador MPPT y el convertidor DC/DC.

Tabla 3. Resultados comparativos (Harrag *et al.*, 2017)

	Current (A)		Speed (rad/s)		Power (W)	
	Direct Mode	Indirect Mode	Direct Mode	Indirect Mode	Direct Mode	Indirect Mode
1000W/m <sup>2</sup>	6.82	11.2	130.6	178.5	672.5	1550
800W/m <sup>2</sup>	4.92	8.85	105.3	154	387	1050
700W/m <sup>2</sup>	4.07	7.3	92.3	136.6	279.2	750
800W/m <sup>2</sup>	4.92	8.85	105.3	154	387	1050
1000W/m <sup>2</sup>	6.82	11.2	130.6	178.5	672.5	1550

Benghanem *et al.* (2013) implementó un sistema de bombeo real para extraer el agua de un pozo profundo de más de 80 m. El estudio se concentró en determinar la conexión más adecuada para un conjunto de paneles solares de 75W/20V. La tipología dada a cada arreglo fue:

- PV1(6S×3P): 18 módulos conectados en tres filas paralelas de 6 módulos conectados en serie.
- PV2(12S×2P): 24 módulos conectados en dos filas paralelas de 12 módulos conectados en serie.
- PV3(8S×3P): 24 módulos conectados en tres filas paralelas de 8 módulos conectados en serie.
- PV4(6S×4P): 24 módulos conectados en cuatro filas paralelas de 6 módulos conectados en serie.



En la (Fig. 18) se observa que la configuración PV3(8S×3P) y PV4(6S×4P) entregan el mayor caudal para una cabeza de 80m. En la (Fig. 19) se observa que la mayor producción de potencia se logra con la configuración PV4(6S×4P), seguida de la configuración PV3(8S×3P). El sistema implementado alcanza a entregar un volumen promedio diario de 22m<sup>3</sup>. Finalmente se recomienda incorporar un sistema de conmutación entre la configuración PV4(6S×4P) y PV3(8S×3P), para que la primera actúe durante las primeras horas del día y posteriormente se reconfigure la conexión por la segunda opción para el resto del día.

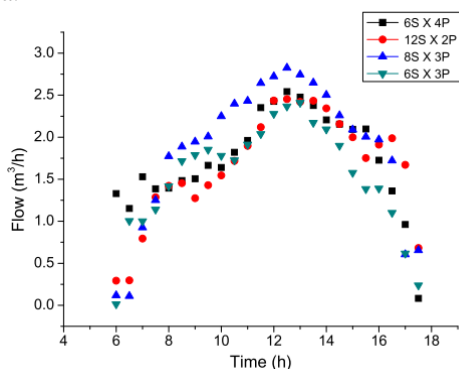


Fig. 18. Variación del caudal durante el día por cada arreglo de paneles. (h=80m)

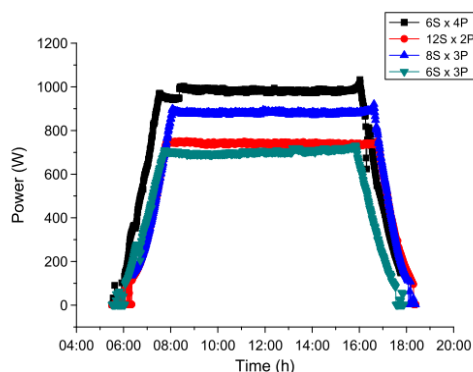


Fig. 19. Variación de la potencia entregada por cada arreglo de paneles durante un día. (h=80m)

Nath y Mandal (2017), implementaron un sistema de bombeo con dos tipos de bombas, una centrífuga y otra de membrana en Kolkata, India; para ser utilizadas en un sistema de riego. Como resultado se presenta que la bomba centrífuga puede resultar más eficiente que la bomba de membrana trabajándose en pequeñas presiones entre 0.1 y 0.2 Kg/cm<sup>2</sup>, a pesar de que la bomba de membrana pueda otorgar mayor presión. A diferentes presiones, la bomba de membrana presenta mejor desempeño para bajas radiaciones, pero cuando la radiación aumenta el desempeño de

la bomba centrífuga supera el de la bomba de membrana. Finalmente, la bomba de membrana puede entregar caudales con presiones 50 veces mayor que la bomba centrífuga, pero para el caso de un sistema de riego, donde la variable presión no es determinante y más cuando existen alrededor acuíferos superficiales, la implementación de un sistema de bombeo solar con bomba centrífuga se convierte en una opción importante y de bajo costo.

Finalmente, Li *et al.*, (2017) describe cuatro retos a enfrentar por un SPVWPS, en relación con su desempeño, y que restringen su fomento entre las comunidades agrícolas. Los retos propuestos necesitan ser direccionados y se discuten a continuación.

- Los sistemas de bombeo solar fotovoltaico son costosos. Estos convierten la energía presente en la luz solar en energía eléctrica mediante uno o varios paneles de silicio poli-cristalino. La celda solar es costosa y tiene una eficiencia del 18% (Pannase y Nanavala, 2017). Con el ánimo de cumplir con la demanda energética de un sistema de bombeo, serán requeridos varios paneles fotovoltaicos, lo cual incrementará aún más los costos iniciales de inversión del proyecto. En tal sentido, es muy importante maximizar la exposición de los paneles a la radiación de la luz solar de acuerdo a las condiciones ambientales del lugar, la carga dinámica total de la bomba, la velocidad de descarga, la selección de componentes y el ángulo de ubicación. Añadir un sistema de seguimiento solar también puede mejorar la potencia de salida (Beleño *et al.*, 2011).
- Otro problema que enfrenta un SPVWPS es la selección del controlador. Existe una gran variedad de controladores a utilizar. El controlador de seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) ayuda a extraer la máxima potencia del panel fotovoltaico. Debido a que la potencia alcanzada del panel fotovoltaico es diferente para diferentes punto de operación, es importante acoplar la carga de tal forma que el módulo fotovoltaico genere la máxima potencia. (M. K. Gupta y Jain, 2013). Los controladores de carga pueden ser utilizados para evitar el exceso de descarga y la sobrecarga de las baterías, logrando así prolongar su vida útil (Subashini y Ramaswamy, 2016).
- Existe una gran cantidad de bombas disponibles en el mercado. Estas deben ser seleccionadas de acuerdo a la carga dinámica

total y la capacidad de descarga para satisfacer las condiciones específicas de la aplicación. La selección correcta del motor de acople es también muy importante para lograr un sistema eficiente. Se debe decidir si el motor a utilizar es DC o AC. Los motores de AC son energéticamente más eficientes que los de DC, pero los motores de AC requieren un inversor DC/AC, el cual genera pérdidas las cuales deben ser consideradas (Parvathy S. y Vivek A., 2015).

- La eficiencia del sistema también depende de los dispositivos de almacenamiento, por lo tanto, estos deberían ser elegidos adecuadamente. En los sistemas SPVWPS se tienen varios enfoques para el almacenamiento de energía, dado que la producción solo se realiza durante las horas en las que se disponga de luz solar. Hay opciones como las baterías de respaldo y los tanques de almacenamiento. Las baterías son utilizadas si el agua es requerida en horas en la noche. Debe evitarse la descarga profunda de las baterías con el fin de prolongar su vida útil (Suresh *et al.*, 2014).

## 5. ESTUDIOS ECONOMICOS PARA LA DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICOS

Los costos de inversión inicial de un SPVWPS son más altos que los de un sistema de bombeo convencional, pero teniendo en cuenta los costos fijos de combustible, el sistema con energía solar fotovoltaica puede resultar más económico en el mediano y largo plazo.

Biswas y Iqbal (2018), presentan una proyección económica para un proyecto de irrigación solar en Bangladesh. El proyecto requiere 1930m<sup>3</sup> de agua por día y para esto se cuenta con sistema de generación fotovoltaico de 30.4kWp. El estudio concluye que, en 25 años de operación del proyecto, el SPVWPS costará la mitad de un proyecto que opere a diésel.

Jamil et al. (2012) propuso un Sistema de bombeo solar para satisfacer la necesidades de agua de una institución de educación en la india. Los costos del proyecto fueron comparados con un sistema actual con motobomba diésel. El retorno de la inversión se estimó en 4 años con un ciclo de vida útil de 20 años, lo cual deja a la institución con un sistema libre de costos por más de 16 años.

## 4. CONCLUSIONES

Los sistemas de bombeo solar fotovoltaico se presentan como una gran oportunidad de recambio y sostenible, de los sistemas de bombeo convencionales, especialmente en zonas rurales.

Mediante la aplicación de técnicas de optimización, la implementación de los sistemas de bombeo solar fotovoltaico puede llegar a ser muy eficiente, económicas y sostenibles. Esto de alguna manera promueve la competitividad del agro y su desarrollo.

Si la aplicación de bombeo no requiere altos niveles de caudal, se recomienda utilizar actuadores de bomba o motores DC, con el fin de evitar la incorporación de un inversor, ya que aumenta los costos de la implementación agrega pérdidas energéticas durante la conversión.

La elección del algoritmo de control MPPT está condicionada a criterios como la velocidad de respuesta, la dinámica del controlador, su estabilidad en régimen permanente, la eficiencia energética, la demanda de recursos hardware den el procesador y el costo de la implementación.

## REFERENCIAS

- Aashoor, F. A. O., & Robinson, F. V. P. (2014). Maximum power point tracking of PV water pumping system using artificial neural based control. In *The 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0923>
- Acevedo Meza, H., Mendoza García, J. L., & Sepúlveda Mora, S. (2018). Estrategias de control MPPT aplicadas en un convertidor DC/DC boost. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(30), 274. <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2751>
- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S. A., Siddiqui, M. U., Alawami, A. T., & Elamin, I. M. (2018). A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87(March 2017), 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.010>
- Andoulssi, R., Draou, A., Jerbi, H., Alghonamy, A., & Khiari, B. (2013). Non linear control of a photovoltaic water pumping system. *Energy Procedia*, 42, 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.033>
- Anoop, J. R., & Reema, N. (2017). Analysis of

- different types of converters for solar water pumping system. *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2017*. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074285>
- Ba, A., Aroudam, E., Chighali, O. E., Hamdoun, O., & Mohamed, M. L. (2018). Performance optimization of the PV pumping system. In *Procedia Manufacturing* (Vol. 22, pp. 788–795). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.112>
- Beleño, K., Torres, I., Pardo, A., & Díaz, J. (2011). Solar positionig system platform using labview an the PIC18F4550 microcontroller. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(18), 125–131.
- Benghanem, M., Daffallah, K. O., Joraid, A. A., Alamri, S. N., & Jaber, A. (2013). Performances of solar water pumping system using helical pump for a deep well: A case study for Madinah, Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 65, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.013>
- Biswas, S., & Iqbal, M. T. (2018). Dynamic Modelling of a Solar Water Pumping System with Energy Storage. *Journal of Solar Energy*, 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/8471715>
- Cepeda, J., & Sierra, A. (2016). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones, 10.
- Chandel, S. S., Nagaraju Naik, M., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- Charutha, K. (2015). Implementation of a Solar Powered DC Motor Pump Set without Battery Backup for Residential and Industrial Applications, 3(3), 1–9. <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2015.0405111>
- Enrique, J. (2011). *Diseño, modelado y optimización de sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia de generadores fotovoltaicos mediante convertidores CC/CC*.
- Enrique, J. M., Durán, E., Sidrach-de-Cardona, M., & Andújar, J. M. (2007). Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies. *Solar Energy*, 81(1), 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.006>
- Gali, V., & Amrutha, P. B. (2016). Fast dynamic response of SEPIC converter based photovoltaic DC motor drive for water pumping system. *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*.
- Gouws, R., & Lukhwareni, T. (2012). Factors influencing the performance and efficiency of solar water pumping systems: A review. *International Journal of Physical Sciences*, 7(48), 6169–6180. <https://doi.org/10.5897/IJPSX12.001>
- Gupta, A. K., & Saxena, R. (2016). Review on widely-used MPPT techniques for PV applications. *2016 1st International Conference on Innovation and Challenges in Cyber Security, ICICCS 2016*, (Iciccs), 270–273. <https://doi.org/10.1109/ICICCS.2016.7542321>
- Gupta, M. K., & Jain, R. (2013). Mppt simulation with dc submersible solar pump using output sensing direct control method and cuk converter. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(1), 186–191.
- Harrag, A., Titraoui, A., Bahri, H., & Messalti, S. (2017). Photovoltaic pumping system - Comparative study analysis between direct and indirect coupling mode. *AIP Conference Proceedings*, 1814. <https://doi.org/10.1063/1.4976221>
- Jamil, M. (2012). SPV based water pumping system for an academic institution. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.11648/j.epes.20120101.11>
- Kalasathya, S. (2016). Implementation of Solar Power Ac Motor Pump Set on MPPT With Battery Backup For Agriculture System. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 5(11), 18928–18932. <https://doi.org/10.18535/ijecs/v5i11.36>
- Kappali, M., Uday Kumar, R. Y., & Sheelavant, V. R. (2013). Harnessing Maximum Power from Solar PV Panel for Water Pumping Application (pp. 236–241). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35864-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35864-7_33)
- Kazimierczuk, M. K. (2012). *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters. Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters*. <https://doi.org/10.1002/9780470694640>
- Li, G., Jin, Y., Akram, M. W., & Chen, X. (2017).

- Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(December 2016), 440–458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.055>
- Malla, S. G., Bhende, C. N., & Mishra, S. (2011). Photovoltaic based water pumping system. In *2011 International Conference on Energy, Automation and Signal* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEAS.2011.6147148>
- Mejia, D., Torres, I., & Diaz, J. (2014). Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos. *Hombre y La Maquina*, 44–55.
- Mishra, A. K., & Singh, B. (2018). Design of solar-powered agriculture pump using new configuration of dual-output buck–boost converter. *IET Renewable Power Generation*, 12(14), 1640–1650. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5258>
- Nandini, D., & Daniel, J. J. (2017). Modelling of BLDC motor driven solar water pump with INC-MPPT in MATLAB. *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2017*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074293>
- Nath, S. R., & Mandal, R. (2017). Some studies on performance analysis of two different laboratory scale solar photovoltaic water pumping in irrigation systems. *International Conference on 21st Century Energy Needs - Materials, Systems and Applications, ICTFCEN 2016*, (March 2015), 0–3. <https://doi.org/10.1109/ICTFCEN.2016.8052739>
- Ordóñez Plata, G., Duarte, C., & Petit Suárez, J. (2018). Método y sistema de irrigación inteligente de paneles fotovoltaicos integrados con techos verdes. Colombia.
- Pannase, V. R., & Nanavala, H. B. (2017). A review of PV technology power generation, PV material, performance and its applications. *Proceedings of the International Conference on Inventive Systems and Control, ICISC 2017*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICISC.2017.8068655>
- Parvathy S., & Vivek A. (2015). A photovoltaic water pumping system with high efficiency and high lifetime. In *2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)* (pp. 489–493). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2015.7229668>
- Robert Foster, Majid Ghassemi, A. C. (2009). *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment. Solar Energy : Renewable Energy and the Environment*. <https://doi.org/10.1039/c0dt00454e>
- Rohit, K. B., Karve, G. M., & Khatri. (2013). Solar Water Pumping system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90007-5)
- Salas, V., Olías, E., Barrado, A., & Lázaro, A. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(11), 1555–1578. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.10.023>
- Shabaan, S., Abu El-Sebah, M. I., & Bekhit, P. (2018). Maximum power point tracking for photovoltaic solar pump based on ANFIS tuning system. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 5(1), 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2018.02.002>
- Shweta Pandey, & Jema Prasanta. (2017). A Review on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems. *National Electrical Engineering Conference (NEEC-2011) on Power and Energy Systems for Tomorrow*, 4(6), 1715–1720.
- Singh, B., & Kumar, R. (2016). Solar PV array fed brushless DC motor driven water pump. *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems, ICPS 2016*, 0–4. <https://doi.org/10.1109/ICPES.2016.7584057>
- Sontake, V. C., & Kalamkar, V. R. (2016). Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1038–1067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>
- Subashini, M., & Ramaswamy, M. (2016). A novel design of charge controller for a standalone solar photovoltaic system. *2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2016*, 237–243. <https://doi.org/10.1109/ICEES.2016.7510647>
- Suresh, H., Baskaran, A., Sudharsan, K. P., Vignesh, U., Viveknath, T., Sivraj, P., & Vijith, K. (2014). Efficient charging of battery and production of power from solar energy. *International Conference on Embedded Systems, ICES 2014*, (Ices), 231–237. <https://doi.org/10.1109/EmbeddedSys.2014.6953164>

- Tremblay, O., Dessaint, L. A., & Dekkiche, A. I. (2007). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *VPPC 2007 - Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (V), 284–289.  
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544139>
- Yahyaoui, I., Nafaa, J., Charfi, S., Chaabene, M., & Tadeo, F. (2015). MPPT techniques for a photovoltaic pumping system. In *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress* (pp. 1–6). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/IREC.2015.7110905>
- Zahab, E. E. A., Zaki, A. M., & El-sotouhy, M. M. (2016). Design and control of a standalone PV water pumping system. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 4(2), 322–337.  
<https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.03.003>