

**DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE
BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO
PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE
BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO
PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O**

**AUTOR:
BYRON RAMIRO VALENZUELA PAZMIÑO**

**TUTOR:
JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO**

Quito, septiembre 2020

Byron Ramiro Valenzuela Pazmiño

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Byron Ramiro Valenzuela Pazmiño (Y'1989-M'10). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio “Fisco misional Sagrado Corazón” de la ciudad de Esmeraldas. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se fundamenta en la determinación del punto de máxima potencia en un sistema solar fotovoltaico basándose en el algoritmo de perturbación observación. bvalenzuela@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Jorge Paúl Muñoz Pilco (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, Quito –Ecuador, 2014, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico. Además, cursó estudios de posgrado como becario de Fundación Carolina en la Universidad Pública de Navarra, Pamplona –España, 2017, obteniendo el título de Máster en Energías Renovables: Generación Eléctrica. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo en la Universidad Politécnica Salesiana. jmunoz@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

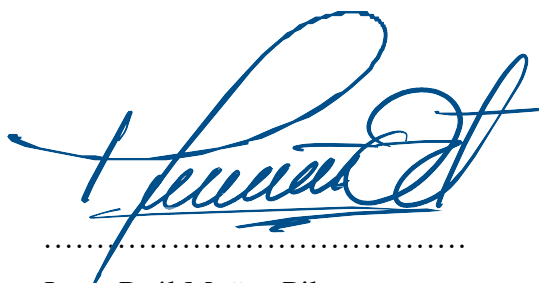
©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O*” realizado por Byron Ramiro Valenzuela Pazmiño, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., septiembre de 2020



Jorge Paúl Muñoz Pilco

C.C.: 1719006189

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Byron Ramiro Valenzuela Pazmiño, con documento de identificación N° 0803114073, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Byron Ramiro Valenzuela Pazmiño
C.C.: 0803114073
Quito, D.M., septiembre de 2020

1. ÍNDICE GENERAL

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción..... | 2 |
| 1.1 | Estructura del trabajo propuesto..... | 4 |
| 2 | Marco teórico | 4 |
| 2.1 | Abastecimiento de agua para riego en la agricultura | 4 |
| 2.1.1 | Sistemas de bombeo de agua para irrigación..... | 5 |
| 2.2 | Sistema de bombeo de agua con tecnología solar | 8 |
| 2.2.1 | Principio de funcionamiento de la bomba fotovoltaica | 8 |
| 2.2.2 | Clasificación de los sistemas de bombeo fotovoltaicos..... | 8 |
| 2.2.3 | Fuentes de abastecimiento de agua para riego | 9 |
| 2.2.4 | Paneles solares para la generación | 9 |
| 2.2.5 | Motores para un sistema de bombeo solar..... | 10 |
| 2.2.6 | Bombas del sistema de bombeo solar | 10 |
| 2.2.7 | Rendimiento de un sistema de bombeo solar | 10 |
| 2.3 | Diseño y configuración de un sistema de bombeo solar..... | 11 |
| 2.3.1 | Métodos de rastreo del punto de máxima potencia para sistemas de bombeo fotovoltaicos | 11 |
| 3 | Modelo matemático..... | 12 |
| 3.1 | Módulos Fotovoltaicos | 12 |
| 3.2 | Control del Punto de Máxima Potencia (MPPT) | 13 |
| 3.3 | Convertidor elevador – Boost..... | 14 |
| 3.4 | Motor CC..... | 15 |
| 3.5 | Bomba solar..... | 16 |
| 4 | Implementación del Modelo Matemático..... | 16 |
| 4.1 | Procedimiento de resolución | 16 |
| 4.2 | Panel Fotovoltaico..... | 17 |
| 4.3 | Controlador..... | 18 |
| 4.4 | Convertidores de Potencia – Boost | 19 |
| 4.5 | Motor CC - Bomba | 19 |
| 5 | Análisis de resultados | 20 |
| 6 | Conclusiones | 23 |
| 6.1 | Trabajos futuros..... | 24 |
| 7 | Referencias | 24 |
| 7.1 | Matriz de Estado del Arte..... | 29 |
| 7.2 | Resumen de Indicadores | 34 |

2. ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Sistema de bombeo fotovoltaico. | 3 |
| Figura 2. Componentes del sistema solar de bombeo [26] | 7 |
| Figura 3. Componentes del sistema eólico de bombeo [27] | 7 |
| Figura 4. Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico..... | 9 |
| Figura 5. Esquema de bombeo solar CC [5] | 9 |
| Figura 6. Esquema de bombeo solar AC [5]..... | 9 |
| Figura 7. Esquema de bombeo solar AC con almacenamiento de baterías [5] | 9 |
| Figura 8. Circuito equivalente para usar en la modelación en MATLAB | 12 |
| Figura 9. Flujograma del algoritmo P&O para MPPT..... | 14 |
| Figura 10. Diagrama del Convertidor-Boost | 14 |
| Figura 11. Modelo eléctrico del Motor CC..... | 15 |
| Figura 12. Bloque General del panel solar – Simulink. | 17 |
| Figura 13. Bloque detallado del panel solar – Simulink. | 18 |
| Figura 14. Curva característica I-V del panel solar..... | 18 |
| Figura 15. Curva característica P-V del panel solar | 18 |
| Figura 16. Bloque MPPT del panel solar - Simulink. | 19 |
| Figura 17. Bloque MPPT con algoritmo P&O – Simulink..... | 19 |
| Figura 18. Bloque Boost – Simulink..... | 19 |
| Figura 19. Bloque Motor CC – Simulink. | 20 |
| Figura 20. Diagrama General del Sistema de Bombeo – Simulink..... | 21 |
| Figura 21. Diagrama detallado del Sistema de bombeo – Simulink. | 21 |
| Figura 22. Potencia de salida del Boost sin MPPT. | 20 |
| Figura 23. Potencia de salida del Boost y MPPT. | 20 |
| Figura 24. Voltaje de salida del Boost y MPPT. | 22 |
| Figura 25. Potencia de salida del Motor CC | 22 |
| Figura 26. Caudal vs Potencia de salida del motor CC con y sin MPPT..... | 23 |
| Figura 27. Caudal vs Potencia de salida del motor CC SFV con MPPT. | 23 |
| Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte..... | 34 |
| Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte..... | 35 |
| Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte..... | 35 |

3. ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tipos de sistemas de bombeo en función del recurso energético [23]..... | 7 |
| Tabla 2. Algoritmo para la simulación del sistema de bombeo fotovoltaico. | 16 |
| Tabla 3. Datos del panel solar | 17 |
| Tabla 4. Valores de irradiancia..... | 17 |
| Tabla 5. Algoritmo para la simulación del sistema de bombeo fotovoltaico. | 18 |
| Tabla 6. Datos de la bomba sumergible a modelar. | 20 |
| Tabla 7. Matriz de estado del arte | 29 |

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O

Resumen

Los recursos hídricos son esenciales para satisfacer las necesidades humanas, proteger la salud, garantizar la producción de alimentos y brindar un desarrollo socioeconómico sostenible, bajo este contexto existe una urgente necesidad de suministrar tecnología ambientalmente racional para el suministro de agua. Para el caso que compete, el sector agrícola depende del proceso de riego el cual usa fuentes de energía para su trabajo, por lo tanto y tomando en cuenta el avance en la tecnología, los sistemas remotos de bombeo fotovoltaicos de agua pueden proporcionar una alternativa viable para cumplir con el riego en sectores rurales. En base a lo expuesto, en el presente trabajo muestra la elaboración de un modelo de sistema de bombeo de agua fotovoltaico eficiente, el cual emplea el rastreador de punto de máxima potencia (MPPT) mediante el algoritmo de perturbación observación P&O, cuya simulación será realizada mediante MATLAB y los resultados validarán que MPPT puede aumentar la eficiencia y el rendimiento del sistema de bombeo de agua FV.

Palabras Clave: Energía solar, bombas de agua, riego, fuentes de energía renovable, desarrollo sostenible, sistemas fotovoltaicos.

Abstract

Water resources are essential to satisfy human needs, protect health, protect food production and provide sustainable socio-economic development. In this context, there is an urgent need to supply environmentally sound technology for the supply of water. For the competing case, the agricultural sector depends on the irrigation process which uses energy sources for its work, therefore, and taking into account the advancement in technology, remote photovoltaic water pumping systems can provide a viable alternative to comply with irrigation in rural sectors. Therefore, this work shows the development of an efficient photovoltaic water pumping system model, which uses the maximum power point tracker (MPPT) using the P&O observation disturbance algorithm, whose simulation will be performed using MATLAB and the results will validate that MPPT can increase the efficiency and performance of the PV water pumping system.

Keywords: Solar energy, water pumps, irrigation, renewable energy sources, sustainable development, Photovoltaic systems.

1 Introducción

El bombeo de agua en gran parte del mundo generalmente depende de la electricidad convencional o de la electricidad producida mediante el uso de generadores que utilizan diésel como energía primaria. Los sistemas de bombeo de agua cuyo funcionamiento es a base del uso de diésel o propano, son relativamente costosos por el valor económico del combustible y su infraestructura además produce contaminación auditiva y ambiental, bajo este antecedente, se señala que el bombeo de agua puede ser realizado usando la energía eléctrica producida por tecnologías que utilizan como fuente primaria energía renovable como por ejemplo la energía solar fotovoltaica con paneles solares, lo cual minimiza la dependencia del uso de combustibles tales como el diésel, el gas o el carbón [1]. En base a las investigaciones realizadas en [2], se puede indicar que el costo asociado a la operación y mantenimiento, así como el reemplazo de una bomba diésel son más altos, de 2 a 4 veces más, que una bomba solar fotovoltaica (FV). Lo cual conlleva a señalar que los sistemas de bombeo solar son amigables con el medio ambiente y en general sus costos se reducen porque no se requieren de un intenso mantenimiento y además el costo de combustibles es nulo [3].

Así mismo, es importante considerar que la escasez de electricidad de la red en zonas rurales y remotas en la mayor parte del mundo resulta una oportunidad para la integración de paneles fotovoltaicos y el uso de energía solar en particular para los sistemas de bombeo. La tecnología es similar a cualquier otro sistema de bombeo de agua convencional, excepto que el origen de la energía es la proveniente de una fuente energía solar [4]. El bombeo de agua fotovoltaica está

ganando importancia en los últimos años debido a la falta de disponibilidad de electricidad y al aumento de los precios del diésel. La velocidad de flujo del agua bombeada depende de la radiación solar incidente como también del tamaño de la matriz FV, por tanto, un sistema fotovoltaico diseñado adecuadamente da como resultado importantes ahorros de costos a largo plazo en comparación con los sistemas de bombeo convencionales; además, los tanques se pueden usar para almacenar agua en lugar de las baterías para el almacenamiento de electricidad, como se señala en [5].

Generalmente la producción agrícola en los países en camino al desarrollo depende mayormente del agua de las lluvias y se ve afectada negativamente por la falta de disponibilidad de agua en los veranos, sin embargo, la radiación solar máxima está disponible en los veranos, ya que se puede bombear más agua para cumplir con los mayores requisitos de agua [6]. De forma complementaria los sistemas de suministro de agua urbana también dependen de la electricidad para bombear agua en las ciudades. De lo citado, existe un amplio alcance para utilizar sistemas de bombeo FV para el suministro de agua en sectores rurales, urbanos, comunitarios e industriales [7], cuyo esquema general corresponde al que se observa en la Figura 1.

Por lo citado, el diseño del sistema de bombeo a través del uso de energía eléctrica producida por paneles fotovoltaicos es de vital importancia, el cual debe considerar la evaluación del rendimiento, el dimensionamiento óptimo, el modelado y la simulación, la degradación del generador fotovoltaico que suministra energía a la bomba y la viabilidad técnica económica de los sistemas de bombeo de agua fotovoltaica dependiendo del uso que se pretenda dar [8]. En tal sentido, a nivel mundial se han

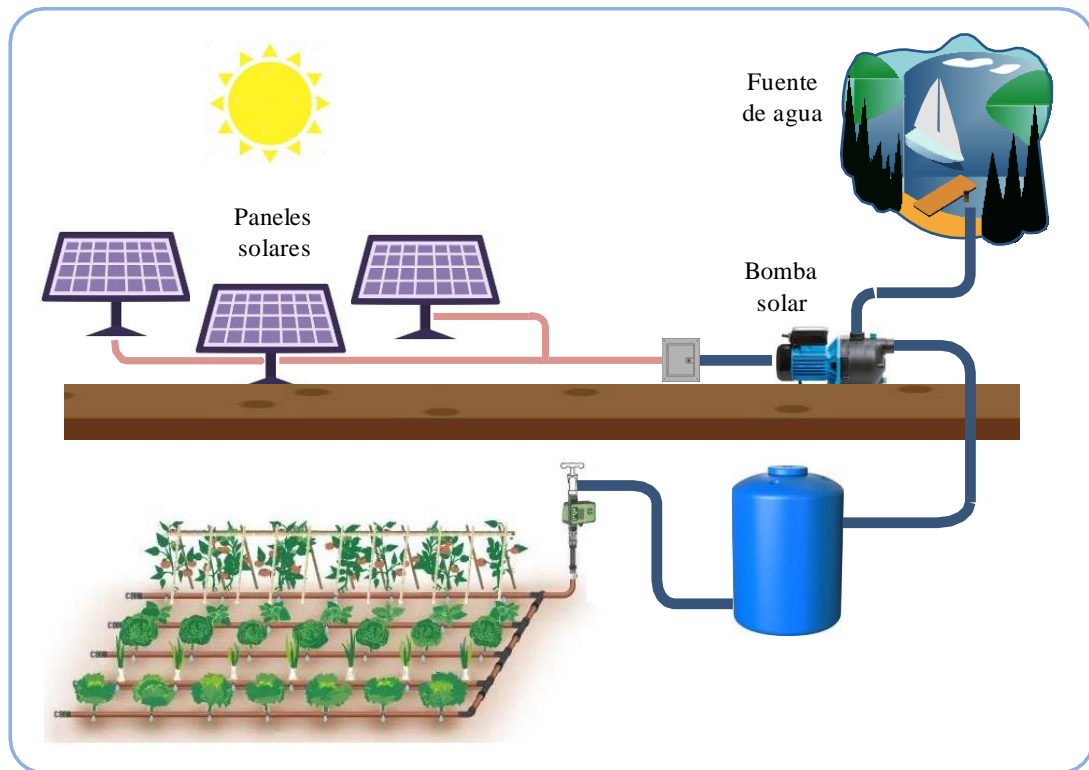


Figura 1. Sistema de bombeo fotovoltaico.

realizado varias investigaciones asociadas al análisis técnico y económico para implementar estos sistemas de bombeo, por ejemplo en [9] se realiza un análisis para determinar la correspondencia entre la potencia del conjunto fotovoltaico y la de la bomba, considerando factores que influyen tales como la intensidad de la radiación de la luz y el ángulo de instalación de los paneles fotovoltaicos, la eficiencia del inversor, logrando así determinar el rango óptimo de la relación de potencia entre los elementos antes citados.

La radiación solar fluctuante disminuye en gran medida la potencia de salida de los módulos solares fotovoltaicos. Razón por la cual en [10] se realiza un enfoque para mejorar la potencia de salida a través de la reconfiguración de los módulos solares fotovoltaicos a través de conexiones eléctricas de conmutación dinámica. En este contexto, el sombreado parcial

también es un problema grave en los sistemas fotovoltaicos solares, el cual reduce drásticamente la potencia de salida, aspecto por el cual en [11]–[13] se analiza esquemas de reconfiguración generalizado para aplicaciones de bombeo PV en condiciones de sombreado parcial, permitiendo de esta forma la reconfiguración de los módulos en una matriz para generar más potencia de salida, usando para el efecto el algoritmo MPPT.

Finalmente, el sistema de bombeo fotovoltaico debe considerar la incorporación del motores que permitan realizar la función objetivo del sistema, en tal sentido [14], muestra la necesidad de evaluar el rendimiento del sistema de bomba de agua fotovoltaica basado en motor de inducción tomando en cuenta convertidor CC-CA con CC-CC de alta frecuencia. De forma similar, [15] muestra la importancia en las áreas rurales la incorporación de un motor de inducción

monofásico de arranque por condensador, el cual reduce el costo inicial y aumenta la vida útil del sistema de bombeo de agua fotovoltaico. En complemento a lo anterior, [16] propone una solución alternativa a través de un sistema integrado de bomba solar de agua que utiliza el concepto CC.

Con base a lo citado, se deduce que la energía renovable ha ganado atención debido al rápido crecimiento del consumo de energía y el problema ambiental, especialmente la energía solar. Razón por la cual en [17], se efectúa un diseño y el análisis integral, incluyéndose el análisis económico que permite evaluar la viabilidad de la energía solar en la aplicación de bombas de agua.

1.1 Estructura del trabajo propuesto

En función a lo descrito en los párrafos precedentes, el presente trabajo se enfoca en determinar un modelo que permita encontrar el punto de máxima potencia de un sistema de bombeo solar fotovoltaico el cual va a ser aplicado al riego en zonas rurales, para el efecto su simulación será realizada mediante SIMULINK de MATLAB, el cual permitirá modelar cada componente del sistema y la parametrización correspondiente.

Sintetizando el contenido, primeramente se presenta un análisis integral sobre la implementación de los sistemas de bombeo fotovoltaico para su aplicación al riego en zonas rurales, de forma consecutiva se detalla los componentes del sistema de bombeo fotovoltaicos con sus respectivos aspectos relevantes, posteriormente se realiza la modelación de cada componente del sistema de bombeo FV, los cuales serán simulados mediante SIMULINK, software que permitirá modelar diferentes parámetros y características del sistema de bombeo para establecer las

conclusiones y recomendaciones correspondientes.

El documento de investigación se constituye de la siguiente manera. La Sección 2 contiene el marco teórico sobre los sistemas de bombeo fotovoltaico. La Sección 3 describe el modelo matemático de los componentes a ser implementado en SIMULINK. La Sección 4 presenta ejecución del modelo matemático. La Sección 5 expone los estudios de los resultados y, por último, se muestran las conclusiones y trabajos futuros.

2 Marco teórico

Dado que el uso del recurso hídrico es esencial para asegurar la producción de alimentos, a continuación, se muestra los aspectos relevantes asociados a los sistemas de riego considerando la implementación de la tecnología ambientalmente racional para el suministro de agua.

2.1 Abastecimiento de agua para riego en la agricultura

Los problemas sociales, independientes a la condición económica de la población, son crecientes cuando el centro de atención es el área rural de una ciudad o estado; es necesario prever de recursos y medios para que las necesidades más básicas sean atendidas debido a que es donde se desarrollan actividades agropecuarias indispensables para el abastecimiento en general de la población, prosperidad de la industria y economía de país.

Los problemas de salud, economía, formación, son igual de importantes de abordar como los de distribución de electricidad y gestión del agua, simbolizan un desafío para los gobernantes y representantes de cada grupo social al tratar de reducir los índices de existencia de cada uno de estos. En lo

referente a gestión del agua, a parte de la distribución eficiente del agua potable, está la otra rama de uso del agua siendo esta la utilizada para riego del área agrícola, indispensable en la cadena de producción, que si es aprovechada eficientemente mediante estrategias para la producción se convierte en clave para el desarrollo agrícola tanto en el mantenimiento como en la expansión [18].

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) dispone de una fuente de información con datos donde se expone que los hogares en áreas rurales menos de la mitad disponen de agua potable y el suministro para riego es aún más escaso, considerando que en lo referente al consumo de agua global aproximadamente el 70% es destinado al riego. La distribución de agua es un derecho y como tal los gobiernos trabajan para que esté alcance de todos, por ende, este recurso llega a las áreas rurales a través de conductos que se impulsan por medio bombas eléctricas o manuales, llaves de agua tradicionales de uso comunitario, pozos o fuentes privadas, pero existen muchas razones por las que estos medios no son eficientes, por este motivo se impulsa actualmente el uso de los recursos renovables para el proceso de bombeo de agua y así se pueda brindar una distribución sin interrupciones y de amplio alcance [19].

2.1.1 Sistemas de bombeo de agua para irrigación

El sistema de bombeo tiene como principio incrementar el nivel de energía de un fluido, de un estado inicial a uno mucho mayor. Los elementos que componen a un sistema de bombeo son principalmente una bomba y un accionador, su interacción consiste en la transferencia de la energía mecánica

proveniente del accionador que puede ser un motor, a energía cinética en forma de presión y velocidad sobre el agua en este caso agua para riego.

El agua utilizada para el bombeo y posterior riego puede provenir de fuentes naturales como la lluvia, aguas subterráneas, también de fuentes de agua superficial de lagos, lagunas o ríos, estas dos dependen de la climatología del lugar, y el agua procedente del alcantarillado o aguas tratadas que son una alternativa de reutilización que se derivan de tuberías direccionadas, pero esta fuente puede tener efectos nocivos para ciertos cultivos y el medioambiente por lo que requiere de una gestión de calidad del agua [20].

Los sistemas de bombeo tradicionalmente utilizan fuentes de energía convencionales, actualmente se suma como alternativa el uso de energías renovables, a continuación, se detalla cada una de estas.

2.1.1.1 Uso de fuentes convencionales en los sistemas de bombeo

El crecimiento de la demanda genera un crecimiento intrínseco de la producción, el sector agrícola está ligado directamente con el energético debido al uso tradicional y continuo de bombas de agua para fines de riego.

La demanda de agua creciente y variable, las pérdidas o fugas, la calidad, los costos de operación y mantenimiento del sistema de agua son inconvenientes que dificultan la planificación en la distribución del agua para las áreas rurales, donde se encuentran la mayor cantidad de áreas de cultivos, por estos motivos los sistemas de agua no se cubren el área total y se encuentran alejadas de ciertos territorios claves, para abastecer de agua a los cultivos los agricultores optan por implementar sistemas de bombeo de agua [21]. Frecuentemente los

agricultores usan tecnologías de riego como [22], [23]:

a) Bombas a base de combustibles fósiles: disponen de un motor de combustión por lo que requieren de combustibles líquidos como el diésel esta tecnología es la más usada por su potencia, la gasolina y gasoil para motores de menos potencia.

Estas bombas permiten suministrar agua de riego a áreas remotas, son responsables de un elevado consumo de energía en conjunto con el alto uso de carbón, diésel son responsables de un alto nivel de contaminación causado por gases de combustión. A parte este sistema tiene limitaciones en cuanto a la disponibilidad de la energía eléctrica, el precio variable de los combustibles y mantenimientos.

b) Bombas que requieren electricidad: como se percibe como principal componente para su funcionamiento es un motor eléctrico (monofásico o trifásico) y de este dependerá la potencia, son económicas pero la dificultad de acceso está entorno a la disponibilidad del recurso energético.

c) Bombas manuales: con el tiempo es la menos usada debido al arduo esfuerzo para la conducción y extracción de agua, es de uso limitado por su tamaño que va en función del caudal y presión que puede soportar.

En función a lo descrito se percibe las limitaciones de las bombas en cuanto al acceso a los recursos, razones por las que se impulsa actualmente el uso de los recursos renovables para su funcionamiento, esta investigación se direcciona a las energías renovables para el bombeo de agua para riego.

2.1.1.2 Energías renovables para los sistemas de bombeo de agua

El agua es un recurso importante y necesario para el desarrollo agropecuario y requiere de estrategias para lograr un uso eficiente del recurso disponible.

El bombeo de agua por motores a combustible son de precio impredecible, producen ruido, contaminación, por estos motivos actualmente las bombas que usan energías renovables son más atractivas ante la necesidad de energía en las áreas rurales, son económicamente favorables representando un reemplazo sostenible y eficiente [24]. Los sistemas de bombeo más usados son los que tienen una bomba solar o eólica que se conecta a la fuente respectiva, al panel o aerogenerador, y la potencia que el agua tiene para el riego depende del diseño de arreglo de paneles solares o del aerogenerador y de la presión que la bomba produce.

A continuación, se exhibe una revisión de las diversas fuentes de energía renovables usadas para el bombeo de agua para irrigación [23], [25]:

a) Recurso solar para bombas de riego: el diseño e implementación de este sistema de riego elimina el requerimiento de la conexión a la red de energía, el uso de combustibles que son escasos en áreas rurales y aprovecha el recurso excesivo de sol en los campos convirtiéndolo en energía eléctrica con la que trabajan las bombas. Son de alta eficiencia debido a las curvas de generación, en los tiempos de mayor radiación son de mayor necesidad de riego, aunque la inversión inicial es alta a lo largo de su vida útil representan una excelente inversión [26].

Es aplicable a cualquier tipo de riego y bombeo, sus componentes básicos son lo que se observan en la Figura 2, y puede modificar añadiendo un sistema

almacenamiento de energía por baterías, si se usa un motor alterno se incluye un inversor, etc.

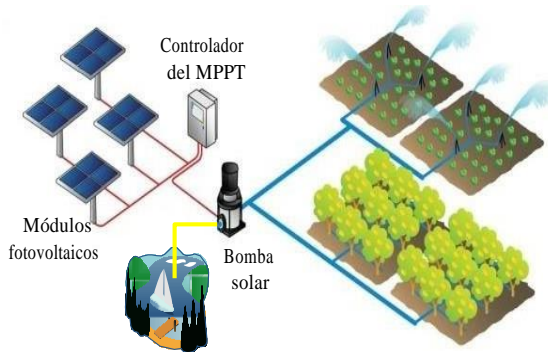


Figura 2. Componentes del sistema solar de bombeo [26].

- b) Bombeo de agua por sistemas eólicos: Tradicionalmente se concurría al uso de un mecanismo de bomba de viento donde un molino impulsado por el viento comprime el aire y acciona una bomba de pistón que permite realizar las actividades agropecuarias, pero su uso es menos frecuente debido a la actual automatización y eficiencia de operación de las turbinas eólicas, este sistema opera convirtiendo la energía eólica de la turbina en energía mecánica, a continuación la convierte en energía eléctrica a través de un generador sincrónico que alimenta al motor que impulsa la rotación de la bomba de agua y posteriormente el agua será destinada a un tanque o directamente al riego [27], como se visualiza en la Figura 3.
- c) Energía por biocombustibles: son los menos frecuentes en uso, y al igual que las bombas de combustibles fósiles, usan combustibles biodegradables con el beneficio de no contaminar el ambiente, pero si generan ruido y los precios son elevados.
- d) Microred: los sistemas de bombeo de este tipo se los consideran como una red híbrida que puede combinar los mecanismos mencionados anteriormente

y considera la alternativa de conectarse a la red eléctrica o usar bombas a combustible, esto depende de la inversión y las necesidades que se presentan [28].



Figura 3. Componentes del sistema eólico de bombeo [27].

Una vez expuestos los conceptos de los tipos de sistemas de bombeo es importante realizar una comparación de estos en función del recurso que usa para su operación como se presenta en la Tabla 1, para identificar la eficacia de cada sistema y determinar su factibilidad de instalación en función de su aplicación.

Tabla 1. Tipos de sistemas de bombeo en función del recurso energético [23].

| Tecnología de bombeo de agua | Ventajas | Desventajas |
|------------------------------|--|---|
| Bomba de agua solar | <ul style="list-style-type: none"> Costo bajo de mantenimiento No produce emisiones. No usa combustibles fósiles. Instalación sencilla De fácil operación Se puede adaptar baterías o iluminación. | <ul style="list-style-type: none"> Depende del recurso solar disponible. Alta inversión inicial. |
| Bombas de agua de diésel | <ul style="list-style-type: none"> Costo de inversión moderado. Opera durante todo el día y noche. Fácil disponibilidad. | <ul style="list-style-type: none"> Costo alto de mantenimiento. Costo elevado de operación. Contaminación del aire y ruido. Supervisión constante. Mantenimiento continuo. |
| Bombas eléctricas | <ul style="list-style-type: none"> Instalación sencilla. Es portable. Fácil disponibilidad. Costo de inversión moderado. | <ul style="list-style-type: none"> Costo elevado de operación. Abastecimiento de energía eléctrica remoto o escaso. |

| Tecnología de bombeo de agua | Ventajas | Desventajas |
|-------------------------------------|---|---|
| Bombeo de agua eólico | <ul style="list-style-type: none"> • No contaminante. • No usa combustibles fósiles. • Robusto. | <ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial elevada. • Mantenimiento costoso. • Disponibilidad limitada. • Impredecible, depende del viento. |
| Ariete Hidráulico | <ul style="list-style-type: none"> • Costo de instalación bajo. • Costo bajo de mantenimiento. • No contaminante. • Instalación sencilla. | <ul style="list-style-type: none"> • Solo se usa para bombeo de agua superficial. |

2.2 Sistema de bombeo de agua con tecnología solar

Cuando tratamos de energías renovables los beneficios son siempre mayores a largo plazo que las tecnologías convencionales, en el presente caso la implementación de paneles solares a los sistemas de bombeo reducen el impacto ambiental, los precios reducen, el mantenimiento es menor y si consideramos que en las áreas donde su uso es amplio se dispone del servicio de energía eléctrica remoto y escaso, el bombeo fotovoltaico es una estrategia inteligente frente a la necesidad creciente de producción agrícola [29].

En cuanto a la función del sistema es el mismo que el bombeo tradicional nada más que incorpora a los paneles como fuente de energía para la bomba. El arreglo de paneles y la radiación solar son factores claves para el manejo del caudal de agua a bombearse. Como se observa en la Figura 2 básicamente el sistema consta de un arreglo de paneles solares, un controlador de carga y una bomba solar que bombea agua a lo largo del día y si se requiere se incorporan tanques de almacenamiento para el riego por la noche y días nublados [1][30].

Inicialmente esta tecnología era costosa y poco eficiente, con el tiempo el rendimiento es mejor y costos son

accesibles para considerarlo con opción en amplias aplicaciones. Es así como se ha incorporado un medio electrónico de control que monitorea los niveles de energía que entregan los paneles y regula la carga que llega a la bomba, este mismo principio se ha implementado en el sistema para cuando se dispone de un tanque de almacenamiento, aquí es donde se mide el nivel del tanque, se inspecciona la velocidad y optimiza el agua realizando el seguimiento del punto de máxima potencia.

Al igual las mejoras en el tamaño y eficiencia de los paneles solares y en las bombas solares al sumar un seguidor del punto de máxima potencia, representan una representativa mejora y en la tecnología y costos totales del sistema [31], [32]

2.2.1 Principio de funcionamiento de la bomba fotovoltaica

Los sistemas solares de bombeo usan la radiación solar como fuente de energía que es captada por los paneles solares y la transforman en energía eléctrica para accionar un motor continuo o alterno que produce energía mecánica, que posteriormente es usada por la bomba para generar energía hidráulica ejerciendo presión sobre el agua.

Los sistemas de bombeo dependen de la presión, potencia y flujo, que son variables que permiten determinar la capacidad del sistema, donde la presión es el trabajo que ejecuta la bomba sobre el agua para elevarla [33]. Este proceso se puede visualizar de forma esquemática en la Figura 4.

2.2.2 Clasificación de los sistemas de bombeo fotovoltaicos

En los sistemas de bombeo solares principalmente se empieza eligiendo a la bomba solar a usarse y esta se clasifica en

función de la corriente con la que trabaja puede ser continua o alterna y en cualquiera de estos tipos es de acoplamiento directo que es el más simple y confiable. Los esquemas de los sistemas de bombeo en función de la bomba a usarse se presentan en las siguientes figuras [5], [34].

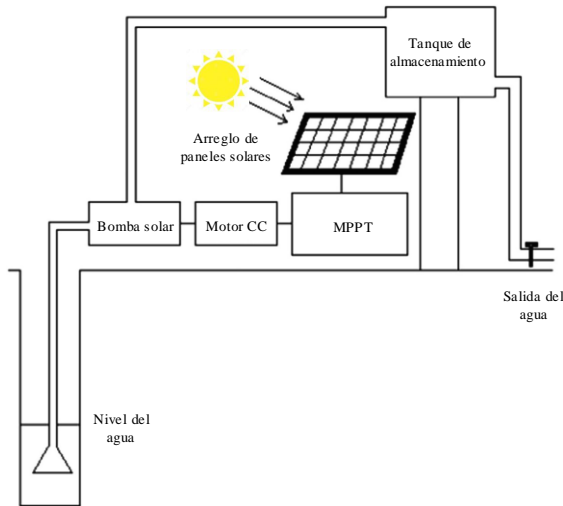


Figura 4. Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico.

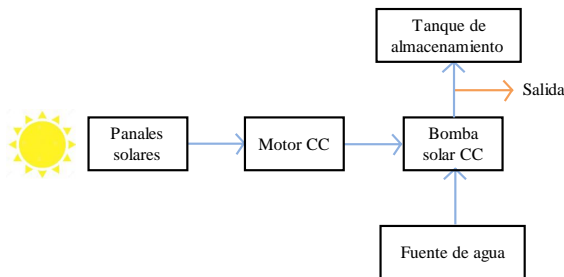


Figura 5. Esquema de bombeo solar CC [5].

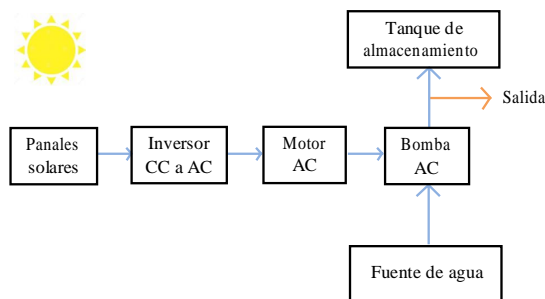


Figura 6. Esquema de bombeo solar AC [5].

2.2.3 Fuentes de abastecimiento de agua para riego

Para la toma de agua de riego se requiere de una fuente que este permanentemente cargada o que por lo menos para el momento de uso se mantenga abastecida, debido a que si la velocidad con la que se extrae el agua es mayor a la que se llena la fuente principal esta se secará y la bomba trabajara en vacío ocasionando daños que pueden ser irreversibles; se debe considerar previamente en el diseño el volumen de almacenamiento de la fuente, el tiempo de llenado y costos [35], [36].

Por lo general la fuente de agua para riego es natural, proviene de agua lluvia, aguas superficiales como ríos, estanques o ríos, y también es de agua reciclada de alcantarillas o de la red pública; para el acceso a cualquiera de estas fuentes se requiere de una gestión adecuada para que el recurso sea aprovechado de forma eficiente y sea de libre acceso [37].

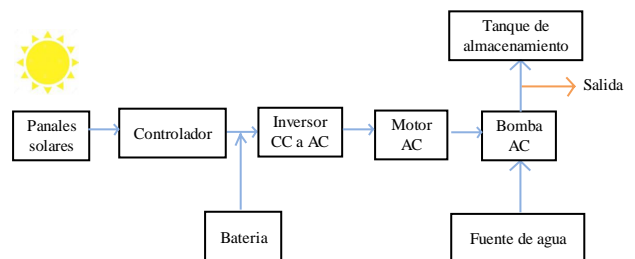


Figura 7. Esquema de bombeo solar AC con almacenamiento de baterías [5].

2.2.4 Paneles solares para la generación

La bomba del sistema de bombeo requiere de una fuente de energía, para el presente tema de estudio se analiza la implementación de paneles solares como generadores de electricidad directa que dependen del clima para producir energía. El módulo de paneles solares puede ser conectado en serie y paralelo, el dimensionamiento va en función del

requerimiento de voltaje y potencia del motor [38].

En función de la radiación se produce un punto de máxima potencia del panel solar que es detectado por el controlador y permite que trabaje la bomba en condiciones de luz y para condiciones de poca luz se añade un amplificador lineal que permite encender la bomba.

2.2.5 Motores para un sistema de bombeo solar

La energía en corriente continua producida por los paneles solares permite el funcionamiento del motor que con frecuencia también es de corriente continua, siempre y cuando el sistema de bombeo sea de potencia baja de menos de 5 kW caso contrario, se requiere de un motor alterno acompañado de un inversor entre el módulo solar y el motor para que se adecue al sistema [39]. El motor asíncrono es menos costoso, robusto, eficiente y no requiere mantenimiento, además brinda mayor control sobre el sistema.

2.2.6 Bombas del sistema de bombeo solar

Las bombas son otro elemento importante de un sistema de bombeo de agua, requieren de diversos accesorios para funcionar óptimamente (válvulas, filtros, etc.) y los materiales de fabricación son resistentes para áreas críticas [40]. A las bombas solares se las clasifican de la siguiente manera:

En función del voltaje con que se va a operar pueden ser:

- Bomba de corriente alterna.
- Bomba de corriente directa.

En función de la toma de agua puede clasificarse en:

- Bomba sumergible, donde el motor y la bomba están

integrados. Extraen agua de pozos y vertientes profundas.

- Bomba superficial, en este tipo de bomba el motor y la bomba están por separado. Extraen agua de ríos, lagos, estanques, etc.
- Bomba flotante, aquí el motor y la bomba están integrados. Extraen agua de depósitos con ajuste de altura.

Y función del principio de funcionamiento las bombas son:

- Bombas dinámicas, estas desarrollan una alta velocidad y presión de líquido, son menos eficientes y requieren menos mantenimiento. Pueden clasificarse en centrifugas y de flujo axial.
- Bombas sumergibles, se caracterizan por forzar el volumen del fluido desde la presión de entrada hacia la salida, son más grandes, costosas y no se acoplan al panel solar.

Se puede comprender que la selección de una bomba está basada en aspectos netamente de diseño como la altura a elevar el agua, la cantidad de agua requerida y la calidad, para que así pueda cumplir con requisitos de flujo.

2.2.7 Rendimiento de un sistema de bombeo solar

Debido al ingreso de esta tecnología por su alto rendimiento, por su amplia aplicación y por el uso de recursos inagotables, es indispensable llevar a cabo estudios de confiabilidad, optimización, económicos, ambientales, de diseño y rendimiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico [41].

A continuación, se destaca ciertos aspectos relevantes que se debe considerar en estos sistemas [42]:

- La eficiencia de uno de los elementos influye en el desenvolvimiento de los demás por ejemplo el desgaste de los paneles solares afecta directamente a la operación de la bomba.
- El rendimiento del sistema en general depende directamente de la condición climática es decir de la radiación solar del área,
- Se debe considerar las pérdidas en cada parte del sistema, desde los paneles por la radiación difusa, en el motor debido a pérdidas por fricción, en la bomba por la succión y descarga, que afectan directamente a la presión y flujo del agua en la salida.
- El caudal también afecta el rendimiento del sistema.

2.3 Diseño y configuración de un sistema de bombeo solar

Los estudios requeridos para implementar un sistema de bombeo, al igual que cualquier otro sistema, deben ser óptimos en este caso se debe aprovechar al máximo el recurso solar para satisfacer la potencia requerida para el área de riego. A fin de realizar el diseño se debe considerar lo siguiente [4], [43]:

- Determinación de la curva óptima de radiación.
- Selección óptima de la configuración del arreglo de los paneles solares en base a métodos numéricos.
- Análisis del sistema hidráulico de la estación de bombeo considerando las variables de profundidad y altura de las que dependerá la presión para distribución del agua.
- En función del clima y de la ubicación topográfica se llega a determinar los requisitos de agua para riego.
- Determinación del punto de máxima potencia fotovoltaica que se necesita

alcanzar para el riego de un área elegida, este estudio considera el diseño y rendimiento del sistema total de riego con bomba solar.

Este trabajo considera parte de estos aspectos para determinar un modelo para encontrar el punto de máxima potencia en un sistema de bombeo solar fotovoltaico aplicado al riego en zonas rurales, para lograr la mayor eficiencia del sistema.

2.3.1 Métodos de rastreo del punto de máxima potencia para sistemas de bombeo fotovoltaicos

Para aprovechar eficientemente la energía renovable en el bombeo de agua de riego es necesario implementar modelos óptimos para el diseño. En el dimensionamiento de la instalación fotovoltaica se considera la temperatura y la irradiancia como variables dinámicas, motivo por el que se requiere obtener el punto de máxima potencia para conseguir el rendimiento máximo de los paneles solares a utilizar; para ello se utiliza métodos automáticos para hallar los puntos óptimos de operación del arreglo y ajustar de manera constante frente a condiciones cambiantes [44][45].

Los algoritmos más habituales desarrollados para controlar el voltaje y garantizar que el sistema implementado opere a máxima potencia todo momento son los descritos posteriormente [46].

2.3.1.1 Algoritmo de perturbación y observación P&O

Este método es el más sencillo de aplicar, consiste en realizar perturbaciones en el voltaje de operación para observar cómo cambia la potencia ante cada perturbación, así con el nuevo voltaje varía la potencia si esta supera a la de trabajo las perturbaciones se deben seguir realizando en el mismo sentido caso contrario si la potencia es menor a la de

trabajo las perturbaciones en el voltaje deben realizarse en el otro sentido, logrando que el panel solar opere con voltaje y corriente cercano al punto de potencia máximo de la célula fotovoltaica [47].

2.3.1.2 Conductancia incremental Este algoritmo realiza una comparación entre conductancias, la incremental versus la instantánea, de un módulo fotovoltaico, el resultado reflejará un incremento o reducción del voltaje hasta que se llegue al límite que es el punto de máxima potencia. Se diferencia al método anterior al ya no variar el voltaje una vez que alcanza en punto de potencia máximo [46].

2.3.1.3 Voltaje a circuito abierto OFC Este procedimiento considera que el punto de máxima potencia es proporcional linealmente al voltaje de circuito abierto del arreglo del módulo solar, es así como se obtiene una constante medida que será el voltaje en el punto de máxima potencia y se utiliza como un dato de entrada para el controlador, esta contante también dependerá del material, tipo de fabricación y escenarios externos [46].

3 Modelo matemático

Con el afán de describir el modelo a ser usado, en los siguientes numerales se muestra la modelación de los elementos constitutivos del sistema.

3.1 Módulos Fotovoltaicos

Este acápite analiza los fundamentos de las células fotovoltaicas y el modelado de una célula fotovoltaica utilizando un circuito eléctrico equivalente, mismo que se visualiza en la Figura 8.

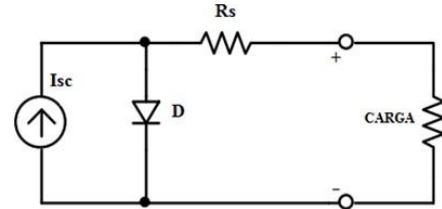


Figura 8. Circuito equivalente para usar en la modelación en MATLAB.

En el modelo mostrado el efecto de la resistencia paralela R_p es muy pequeño, razón por la cual es despreciable en el modelado. El modelo también debe incluir efectos de temperatura en la corriente de cortocircuito I_{sc} y la de saturación inversa del diodo I_0 . Para el diodo se utiliza el factor de idealidad n establecido para lograr la mejor coincidencia de curva $I - V$. La siguiente ecuación representa la relación corriente-voltaje del módulo PV.

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{nkT}} - 1 \right] \quad (1)$$

Dónde: I es la corriente de la celda = la corriente del módulo, V es el voltaje de celda, T es la temperatura celular en Kelvin. La corriente de cortocircuito I_{sc} se calcula a una temperatura de celda dada T .

$$I_{sc|T} = I_{sc|T_{ref}} \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (2)$$

Donde la I_{sc} a T_{ref} es obtenida de la hoja de datos (medido bajo la irradiancia de 1000 W/m^2), T_{ref} es la temperatura de referencia del módulo PV en (K), generalmente 298K (25°C), y α es el coeficiente de temperatura de I_{sc} en porcentaje de cambio por grado de temperatura también indicado en la hoja de datos [48]. La corriente de cortocircuito I_{sc} es proporcional a la cantidad de irradiancia, en tal sentido la I_{sc} a una irradiancia dada (G) se describe:

$$I_{sc|G} = \left(\frac{G}{G_0} \right) \cdot I_{sc|G_0} \quad (3)$$

Donde G_o es el valor nominal de irradiancia 1000 W/m^2 .

El factor de idealidad del diodo proporciona I_o la corriente de saturación inversa del diodo a la temperatura de referencia T_{re} , se detalla a continuación con.

$$I_o = \frac{I_{sc}}{e^{qV_{oc}/nkT} - 1} \quad (4)$$

La corriente de saturación inversa I_o depende de la temperatura, por tanto I_o a una temperatura dada T se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$I_o|_T = I_o|_{T_{ref}} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^n \cdot e^{-nk \cdot \left(\frac{q \cdot E_g}{T} - \frac{q \cdot E_g}{T_{ref}}\right)} \quad (5)$$

El factor de idealidad del diodo n es desconocido y debe ser estimado, generalmente toma un valor entre uno y dos. Sin embargo, el valor de $n = 1$ (para diodo ideal) se usa hasta generalmente. La resistencia en serie R_s del módulo fotovoltaico tiene un gran impacto en la pendiente de la curva $I - V$ cerca del voltaje de circuito abierto V_o . Por lo tanto, el valor de R_s se calcula evaluando la pendiente de la curva $I - V$ en el V_o . La ecuación correspondiente se muestra a continuación:

$$R_s = -\frac{dI}{dV} - \frac{nkT/q}{I_o \cdot e^{q(V+I \cdot R_s)/nkT}} \quad (6)$$

Para el voltaje de circuito abierto $V = V_{oc}$ y la $I = 0$, se describe a continuación:

$$R_s = -\frac{dI}{dV}|_{V_{oc}} - \frac{nkT/q}{I_o \cdot e^{qV_{oc}/nkT}} \quad (7)$$

Finalmente, se resuelve la ecuación de las características $I - V$, a través del método de Newton para una rápida

convergencia de la respuesta, cuya ecuación se muestra a continuación:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_o [e^{q(V+I_n R_s)/nkT} - 1]}{-1 - I_o \cdot \left(\frac{q \cdot R_s}{nkT}\right) \cdot e^{q(V+I_n R_s)/nkT}} \quad (8)$$

3.2 Control del Punto de Máxima Potencia (MPPT)

Un componente importante en los sistemas fotovoltaicos para la producción de energía es el seguimiento del Punto de Máxima Potencia – MPPT por sus siglas en inglés (Maximum Power Point Tracker), para el efecto se han desarrollado técnicas para detectar la energía máxima entregada por medio de controles.

Los métodos más comunes son las de Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y Lógica difusa. De forma complementaria a dichos métodos, actualmente existen sistemas de posicionamiento automático que permite ubicar al panel con un ángulo de incidencia solar de 90° para mejorar el rendimiento de estos módulos.

Cualquiera de los algoritmos de seguimiento del MPPT ha sido implementado en los inversores fotovoltaicos para ajustar continuamente la impedancia registrada por el arreglo de paneles solares con el fin de que el funcionamiento del sistema FV se mantenga en la cresta de potencia del panel solar, considerando la dinámica del comportamiento, como irradiación, temperatura, y carga.

Para el caso de esta investigación se usará la técnica o algoritmo denominado Perturbación y Observación (P&O), mismo que según [49], describe un mejor rendimiento y periodo de convergencia hacia los puntos picos de mayor potencia, dicho algoritmo perturba el voltaje de funcionamiento para asegurar la potencia

máxima, cuyo algoritmo MPPT de P&O se muestra en la Figura 9.

Como se muestra en el flujograma, la técnica de perturbación y observación consiste en la alteración de la relación de disparo del convertidor que posteriormente modifica a la corriente que suministra el módulo solar, debido a este proceso el voltaje de operación del panel solar debe ser supervisado, por ejemplo la perturbación se realiza cuando se procede a elevar el voltaje, en consecuencia aumenta la potencia absorbida por la carga y este es el efecto de observación, la causa de este efecto es la variación del punto máxima potencia ahora este es el nuevo punto de operación; si por el contrario se produce la disminución de la potencia absorbida por la carga ahora el voltaje será el que se perturbe y el punto de operación será contrario al de máxima potencia. El algoritmo, como tal se detalla a continuación.

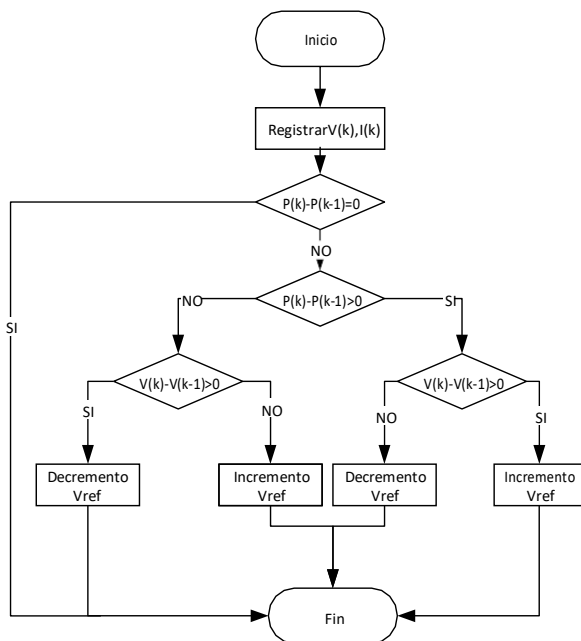


Figura 9. Flujograma del algoritmo P&O para MPPT.

3.3 Convertidor elevador – Boost

Este elemento posee un transistor y un diodo llamados elementos activos ya que

son actuadores dentro del circuito, y dispone también de un condensador y una bobina que son elementos pasivos porque almacena energía, este esquema se presenta en la Figura 10. El convertidor es un elevador debido que suministra un voltaje mayor al de entrada.

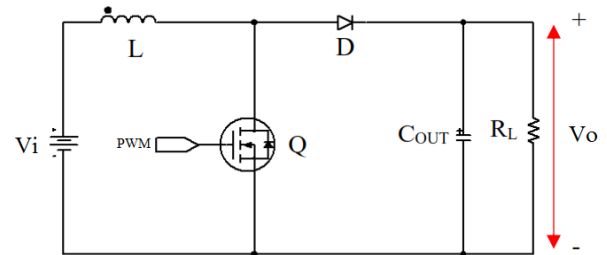


Figura 10. Diagrama del Convertidor-Boost.

El convertidor cumple una función en dos estados, primero el de conducción por medio de una señal forzada de control en un transistor y la de corte. Debido a esta operación continua la llegada a cero de la corriente en el inductor no se produce; y el voltaje resultante depende del diodo donde están involucrados los semiconductores y el voltaje inicial, tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$V_o = \frac{1}{1 - D} \cdot V_i \quad (9)$$

En los sistemas de bombeo se deben evitar la discontinuidad en la operación ya que puede ocasionar daños mecánicos, por este motivo la corriente en el convertidor deber ser limitada para que siempre circule un mínimo de corriente por la bobina aun cuando el consumo de la carga sea mínimo la corriente debe ser de al menos un 20%, esto debido a que el tiempo es menor al de conmutación la corriente tiende a pasar por cero y puede discontinuar el proceso.

A fin de lograr lo citado, se debe establecer la valía de la inductancia y capacitancia, considerando en los

semiconductores la periodicidad de conmutación, la formulación para determinar los valores de estos parámetros se muestra a continuación:

$$L_{min} > \frac{D}{2 I_{pv} f_{sw}} \cdot V_{pv} \quad (10)$$

$$C > \frac{I_o \cdot D}{f_{sw} \cdot \Delta V_o} \quad (11)$$

Donde:

- I_{pv} Corriente de módulo solar.
- V_{pv} Voltaje del módulo solar.
- D Ciclo de operación.
- f_{sw} Frecuencia de la conmutación.
- I_o Corriente en la carga.
- ΔV_o Voltaje en el capacitor.

3.4 Motor CC

Para el presente estudio se ha considerado la utilización de un motor de CC, el cual será el elemento primordial para el sistema de bombeo. En este tipo de motores, la velocidad y el par del motor el proporcional a la potencia que puede alcanzar, de la misma manera el par motor le corresponde directamente al flujo en el inductor y a la corriente de la carga, la velocidad por su parte varía en función del funcionamiento y por ende del flujo magnético. En la Figura 11 se muestra el esquema de este elemento.

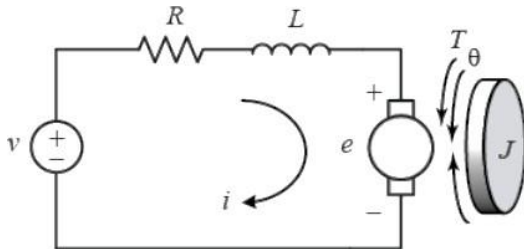


Figura 11. Modelo eléctrico del Motor CC.

Para el modelado de este elemento, la armadura tiene una resistencia e

inductancia constantes, el esquema tiene una alimentación que entrega un voltaje al motor, el modelo matemático se lo representa así:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (12)$$

$$L \frac{di(t)}{dt} = v(t) - Ri(t) - e(t) \quad (13)$$

Al obtener $i(t)$ se tiene el voltaje que genera al mover por los conductores un flujo de campo inducido por la corriente como se desarrolla en la ecuación (14). La potencia mecánica que resulta de este evento es entregada a la carga en este caso el motor, donde se debe considerar que se producen diferentes pérdidas (histéresis, fricción, corrientes de Foucault, etc.).

$$T_m(t) = J \frac{dw(t)}{dt} + B \cdot w(t) \quad (14)$$

Donde:

- $T_m(t)$ Torque del motor.
- B Coeficiente de fricción.
- J Momento de inercia.
- $w(t)$ Velocidad angular.

Con base a la formulación antes descrita y dada la proporcionalidad de las variables se determina una contante de proporcionalidad Ka , que es una relación entre el voltaje que es inducido en la armadura y la velocidad del eje, de la misma forma el torque corresponde proporcionalmente a la corriente en el motor CC mediante un valor constante Km , la formulación se muestra a continuación.

$$e(t) = Ka \cdot w(t) \quad (15)$$

$$T_m(t) = Km \cdot i(t) \quad (16)$$

3.5 Bomba solar

Para el caso de análisis se considerará bombas solares que operan directamente con los arreglos de paneles solares por medio de un regulador y no utiliza baterías, estas bombas solares son robustas frente a condiciones ambientales y mecánicas, tienen un motor eléctrico de corriente continua CC o DC descrito en el numeral anterior.

El trabajo realizado por la bomba debe ser constante y actuar al máximo rendimiento dependiendo del caudal, estos valores son de fábrica y son proporcionados en los catálogos durante la adquisición de la bomba, aquí estará la curva de funcionamiento con los valores que indican el caudal que permite trabajar a la bomba en un rendimiento óptimo y máximo. Para la evaluación de la potencia, la modelación considerará la siguiente formulación matemática.

$$P_{Bomba} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h_b \cdot \varphi \quad (17)$$

Donde:

| | |
|-------------|------------------------------|
| P_{Bomba} | Potencia de la bomba. |
| ρ | Densidad del agua o fluido. |
| g | Gravedad. |
| Q | Caudal. |
| h_b | Altura dinámica de la bomba. |
| φ | Rendimiento. |

Finalmente, el consumo energético de la bomba, en base al rendimiento φ , al caudal proporcionado Q y a la altura dinámica h_b puede ser determinado por la siguiente ecuación:

$$E_{Bomba} = \frac{Q \cdot h_b}{367 \cdot \varphi} \quad (18)$$

4 Implementación del Modelo Matemático

La implementación de la modelación matemática descrita en los numerales anteriores será efectuada mediante

SIMULINK de MATLAB. Para el efecto, a continuación, se detallará de forma modular la implementación de cada uno de los elementos, cuya interacción permitirán obtener los resultados para el establecimiento de aspectos concluyentes.

4.1 Procedimiento de resolución

Como se ha mencionado, mediante el uso de SIMULINK se establecerá los diagramas de bloques, en cada uno de ellos se establecerán los parámetros de entrada que permitirán realizar las simulaciones correspondientes. Por lo expuesto, de forma inicial se seleccionarán los elementos que conformarán el sistema de bombeo y se determinarán los valores nominales con los cuales se procederá a realizar las funciones que permitan la simulación.

Como resultado de la interacción de los bloques de simulación, se obtendrá los diagramas de las variables eléctricas que permitirán establecer conclusiones. Para el estudio se usarán cuatro valores de irradiancias que permitirán evaluar el modelo propuesto.

En la Tabla 2 se indica el algoritmo para la resolución de la simulación a ser desarrollada:

Tabla 2. Algoritmo para la simulación del sistema de bombeo fotovoltaico.

| | |
|----------------|--|
| Paso 1: | Adquisición de los datos de los elementos del sistema de bombeo. Panel fotovoltaico Bomba Controlador |
| Paso 2: | Set parametrización en los bloques correspondientes a cada elemento |
| Paso 3: | Parametrización y modelación del P&O |
| Paso 4: | Simulación de cada escenario de irradiancia seleccionada. |

Paso 5: Obtención de los variables eléctricas y elaboración de diagramas

Paso 6: Análisis de resultados

Paso 7: Fin

A fin de poder efectuar el análisis de a continuación, se precisan los parámetros a ser usados para las simulaciones.

4.2 Panel Fotovoltaico

Para el desarrollo del estudio se usará un panel fotovoltaico que es usado comercialmente en Ecuador, el cual corresponde a SOLTECH 1STH – 215- P de Posharp cuyas características y datos se muestran a continuación:

Tabla 3. Datos del panel solar.

| PANEL Soltech 1STH-215-P | | |
|--|---------|--------------------|
| Máxima Potencia del Panel | 213.15 | Wp |
| Corriente de cortocircuito (Isc) | 7.84 | A |
| Voltaje de circuito abierto (Voc) | 36.3 | V |
| Voltaje a máxima potencia (Vpm) | 29 | V |
| Corriente a máxima potencia (Ipm) | 7.35 | A |
| Coefficiente de temperatura de Voc | -0.3609 | %/°C |
| Coefficiente de temperatura de Isc | 0.102 | %/°C |
| Eficiencia del Panel | 13.7 | % |
| Temperatura ambiente | 23.7 | °C |
| Temperatura de operación nominal de la célula (TONC) | 45 | °C |
| Irradiancia Máxima | 969.05 | W/m ² |
| Irradiancia Mínima | 18.22 | W/m ² |
| Hora sol Pico (HSP) | 5.22 | kWh/m ² |
| Superficie | 20 | m ² |
| Coefficiente de temperatura (KT) | 0.0044 | °C ⁻¹ |

De la misma forma y con el objeto de poder realizar las funciones de transferencia en MATLAB, se usará cinco tipos de irradiancia directa las cuales fueron registradas en el sector norte de la ciudad de Quito, según lo registrado en [50], las cuales servirán para simular condiciones de baja, media y alta irradiancia, cuyos valores son:

Tabla 4. Valores de irradiancia.

| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| W/m ² | 18.22 | 183.36 | 516.5 | 776.88 | 969.05 |
| °C | 11.88 | 13.19 | 16.6 | 16.99 | 19.62 |
| Horas | 5-6 | 6-8 | 8-10 | 10-11 | 11-13 |
| | 17-18 | 16-17 | 15-16 | 13-14 | |

Para integrar el panel solar al modelo de simulación a través de MATLAB – Simulink se integra un bloque que se lo analizara subsiguientemente. A continuación, en la Figura 12, se muestra el sistema global.



Figura 12. Bloque General del panel solar – Simulink.

El sistema a modelar permite la modificación de las variables de irradiancia y temperatura con el fin de evaluar los efectos de las mismas en el sistema, los datos a usarse serán los mostrados en las tablas anteriores. Como se mencionó el controlador del punto de máxima potencia MPPT impondrá el voltaje y el panel fotovoltaico proporciona una corriente en función a la curva de operación. El bloque general tiene incorporado sub-bloques, que se muestran en la Figura 13.

En la Figura 13 se introducen los diferentes parámetros del panel solar, los cuales son ingresados por medio de un script por programación externa en Matlab, una vez incluidos los datos y las

funciones, se procede a realizar la simulación, de donde se obtiene las curvas características del sistema solar diseñado, mismas que se presentan en la

Figura 14. Para el caso de la Curva I-V se denota un decremento del voltaje por el rendimiento del panel en función de la temperatura, mientras que la curva P-V demuestra que el voltaje juega un papel importante para la salida de potencia, aspecto relevante para la determinación del MPPT.

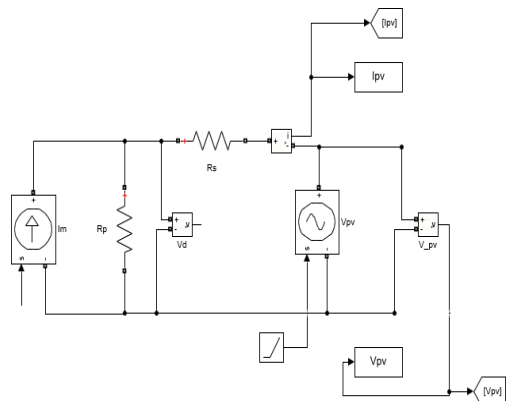


Figura 13. Bloque detallado del panel solar – Simulink.

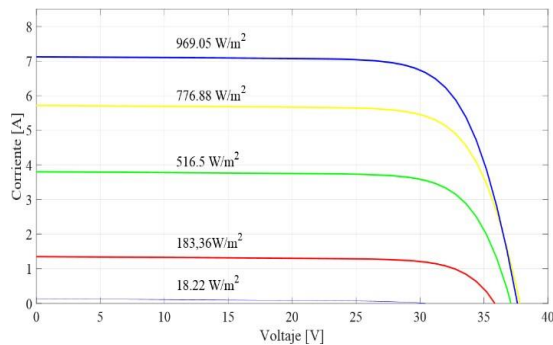


Figura 14. Curva característica I-V del panel solar.

4.3 Controlador

El controlador se basa en el algoritmo de seguimiento del punto de potencia máxima que se implementan en los inversores fotovoltaicos con el objetivo de ajustar continuamente la impedancia del arreglo fotovoltaico, dentro de este algoritmo se usará el algoritmo de Perturbación y observación (P&O), para

alterar el voltaje de operación y garantizar la potencia máxima. En la siguiente Figura 16 se muestra el bloque general a través del cual se modela el MPPT con el algoritmo P&O, el cual incrementará la eficiencia del panel fotovoltaico.

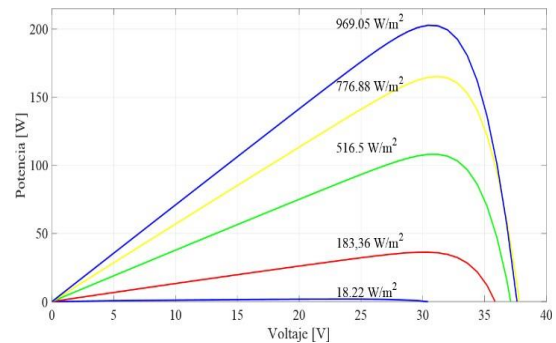


Figura 15. Curva característica P-V del panel solar.

Tabla 5. Algoritmo para la simulación del sistema de bombeo fotovoltaico.

| | |
|----------------|--|
| | Definir los valores de las variables asociadas a la función – Voltaje y Potencia – como variables persistentes Pprev y Vprev (Potencia y Voltaje previos) y Dprev (Ciclo de trabajo previo) |
| Paso 1: | |
| Paso 2: | Inicializar las variables de voltaje y potencia y desviación Dprev, Vprev=0, Pprev=0 |
| Paso 3: | Inicializar parámetros del algoritmo deltaD (variación del ciclo de trabajo) |
| Paso 4: | Calcula el vector de Potencia $P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$ |
| | Incremento o decremento del ciclo de trabajo. Si $P_{pv} - P_{prev} \neq 0$ Si $P_{pv} - P_{prev} > 0$ $V_{pv} - V_{prev} > 0 \rightarrow D = D_{prev} - \text{deltaD}$ $V_{pv} - V_{prev} < 0 \rightarrow D = D_{prev} + \text{deltaD}$ |
| Paso 5: | Si $P_{pv} - P_{prev} < 0$ |

$V_{pv} - V_{prev} > 0 \rightarrow D = D_{prev} + \Delta D$
 $V_{pv} - V_{prev} < 0 \rightarrow D = D_{prev} - \Delta D$
 Si $P_{pv} - P_{prev} = 0$
 $D = D_{prev}$

Paso 6: Actualizar valores internos
 $D_{prev} = D$
 $V_{prev} = V_{pv}$
 $P_{prev} = P_{pv}$

Paso 7: Fin

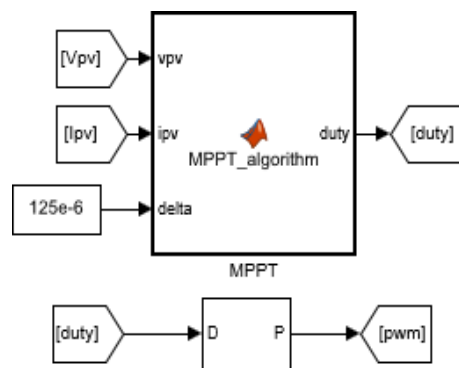


Figura 16. Bloque MPPT del panel solar - Simulink.

El bloque de detalle que contiene el algoritmo P&O se observa en la Figura 17.

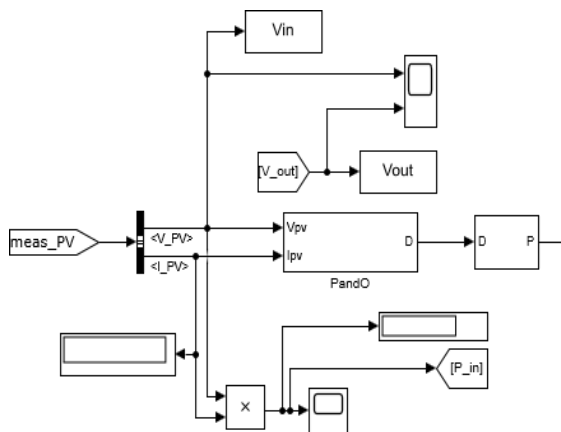


Figura 17. Bloque MPPT con algoritmo P&O – Simulink.

4.4 Convertidores de Potencia – Boost

Como se ha citado, el diseño de un controlador digital con simulación requiere la inclusión de un convertidor Boost CC-CC el cual regulará adecuadamente el voltaje conforme cambian la corriente de carga y el voltaje de la fuente, el bloque desarrollado se muestra en la Figura 18.

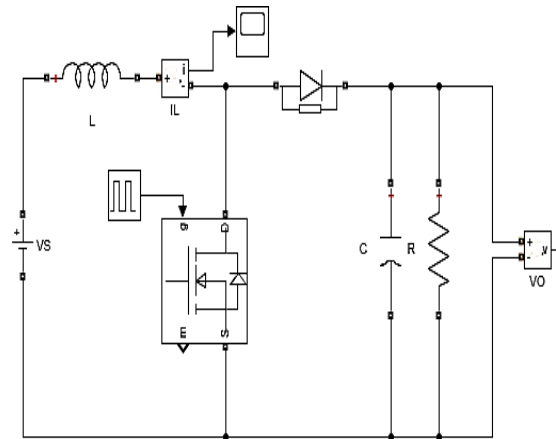


Figura 18. Bloque Boost – Simulink.

El convertidor proporciona un voltaje mayor a su salida que a la entrada, este tiene elementos pasivos y activos como se describió a detalle anteriormente.

4.5 Motor CC - Bomba

Muchos sistemas de bombeo de agua fotovoltaica emplean motores de corriente continua porque pueden acoplarse directamente con matrices fotovoltaicas y hacer que el sistema sea muy simple.

Entre los diferentes tipos de motores de CC, se prefiere un motor de imán permanente de CC en los sistemas fotovoltaicos porque puede proporcionar un mayor par de arranque. La Figura 19 muestra el bloque que corresponde a la modelación de un motor eléctrico CC.

Cabe mencionar que, cuando el motor funciona bajo condiciones bloqueadas durante mucho tiempo, puede acortar la vida del motor debido a la energía eléctrica de entrada convertida en calor en lugar de salida mecánica. Para superar este problema, se puede usar un MPPT un amplificador de corriente lineal (LCB).

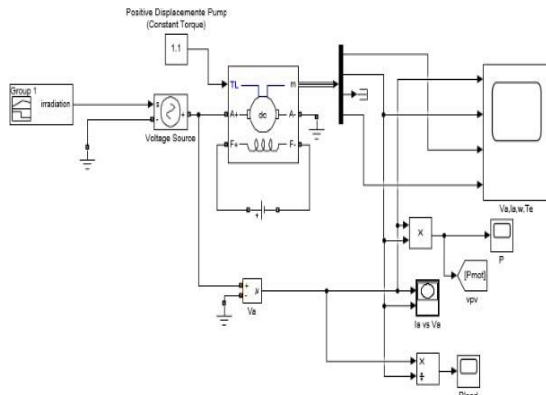


Figura 19. Bloque Motor CC – Simulink.

Para el caso de estudio se usará una bomba sumergible de agua para una altura de 1 m, provista de motor cuyo modelo corresponde al denominado DC PS600 C-SJ5-8 LORENTZ, la cual está formada por cabeza de bomba y motor para bombeo de agua solar para pozos de 4", riego y aplicaciones de pequeño y mediano tamaño. Diseñada para aumentar el rendimiento de bombeo solar y reducir los costes, aprovechando la máxima energía de radiación solar disponible, los datos de placa son:

Tabla 6. Datos de la bomba sumergible a modelar.

| Bomba sumergible: DC PS600 C-SJ5-8 | | |
|------------------------------------|------|-------------------|
| Altura máxima (He) | 30 | m |
| Distancia de riego | 10 | m |
| Densidad del Agua(p) | 1000 | kg/m ³ |
| Potencia Nominal | 15 | kW |

| | | |
|------------------------|----------|-------------------|
| Caudal Máximo (Q) | 6.5 | m ³ /h |
| Eficiencia | 92 | % |
| Revoluciones del motor | 900-3300 | rpm |
| Clase de aislamiento | F | |
| Modo de protección | IP68 | |

Una vez detallado el modelo, en la Figura 22 se muestra el esquema general de bloques a ser implementado, mientras que la Figura 23 se muestra el esquema detallado del sistema de bombeo.

5 Análisis de resultados

Considerando el esquema completo del sistema de bombeo, se ha procedido a realizar las correspondientes simulaciones. En primera instancia se analizará la potencia a salida del panel fotovoltaico y el Boost sin usar el controlador MPPT con el objeto de compararla con la potencia de salida del panel fotovoltaico, incluyendo el accionar del Boost y controlador MPPT que contiene el algoritmo de Perturbación y Observación.

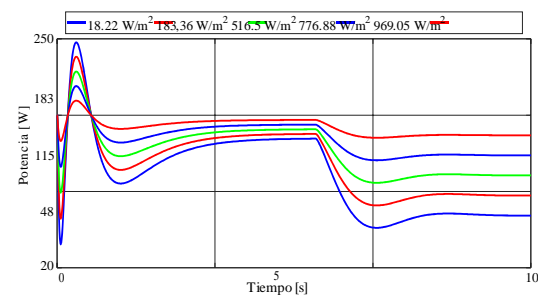


Figura 20. Potencia de salida del Boost sin MPPT.

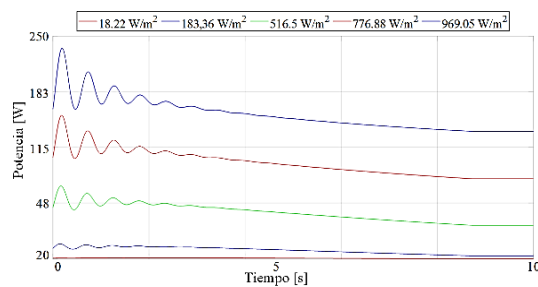


Figura 21. Potencia de salida del Boost y MPPT.

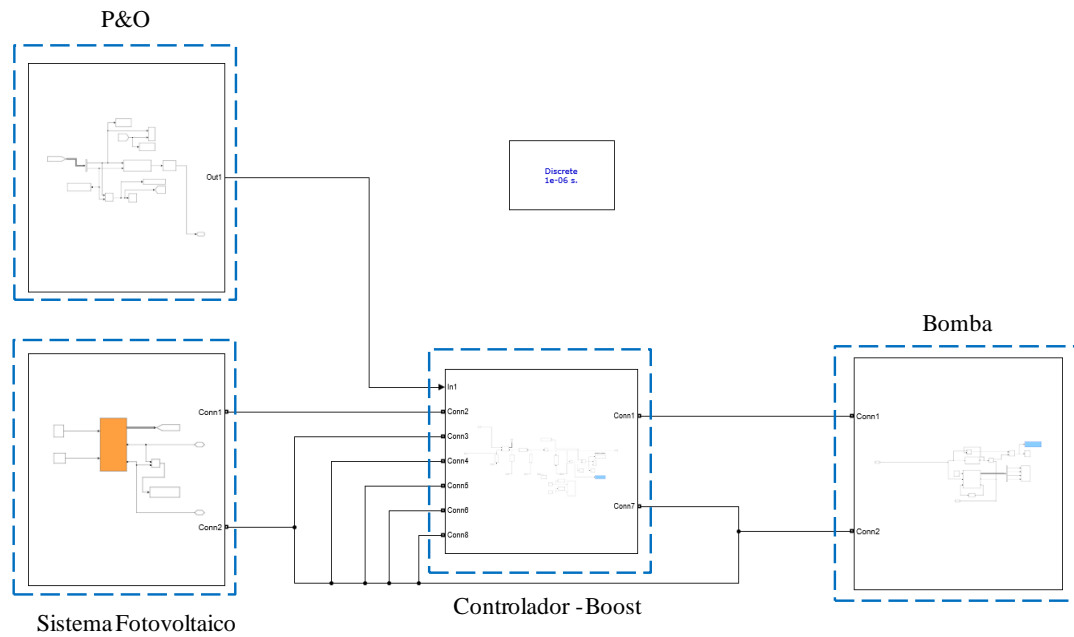


Figura 22. Diagrama General del Sistema de Bombeo – Simulink

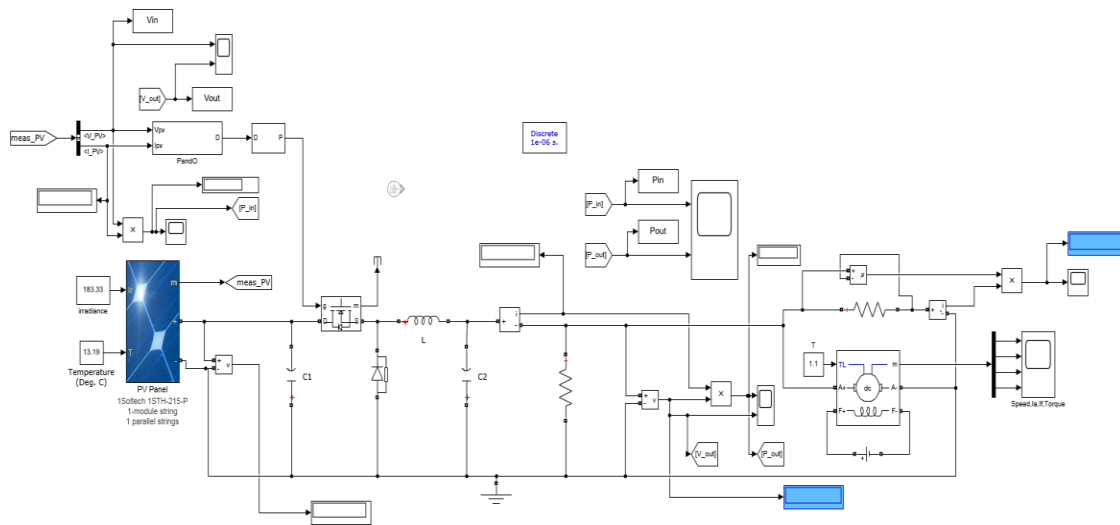


Figura 23. Diagrama detallado del Sistema de bombeo – Simulink.

Como se observa, la Figura 21 muestra una potencia estable en el tiempo que obedece al controlador MPPT a comparación de lo muestra la Figura 20 donde existen variaciones significativas en la salida de potencia, aspecto que permite validar que el controlador MPPT con el algoritmo se encuentra realizando la función que se esperaba.

En tal sentido, la potencia del panel fotovoltaico con MPPT garantiza una entrega de potencia y energía al motor CC, cuyo efecto también se ve reflejado para cualquiera de las irradiancias propuestas. Se denota que para una irradiancia de 969.05 W/m^2 , la potencia se estabiliza a los $144,4 \text{ W}$. De la Figura 24 se deduce que, el Boost y el bloque de MPPT realizan su función, dado que el voltaje en instantes iniciales y de forma transitoria se incrementa, pero a medida de que transcurre el tiempo, el MPPT trata de que el voltaje de salida se estabilice en un valor que permita entregar la máxima potencia, el efecto descrito se ve reflejado para cada una de las cinco irradiancias analizadas.

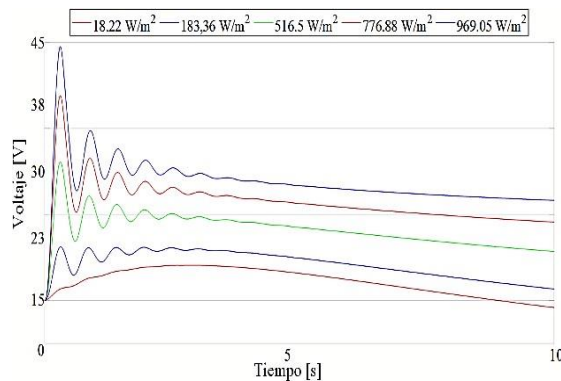


Figura 24. Voltaje de salida del Boost y MPPT.

Con base a lo citado, se puede observar que a una irradiancia de 969.05 W/m^2 , el voltaje se estabiliza a los 28.7 V , lo cual es congruente, ya que según el dato de placa del panel, el voltaje que permite garantizar la máxima potencia corresponde a 29 V , en tal sentido se

concluye que el modelado del Boost y el MPPT permiten que el panel fotovoltaico incremente su eficiencia a fin de entregar la gran cantidad de potencia al motor de CC. La potencia y voltaje entregados por el panel fotovoltaico al motor CC servirán de insumo para que este pueda realizar su trabajo cuya potencia de salida se muestra en la Figura 25.

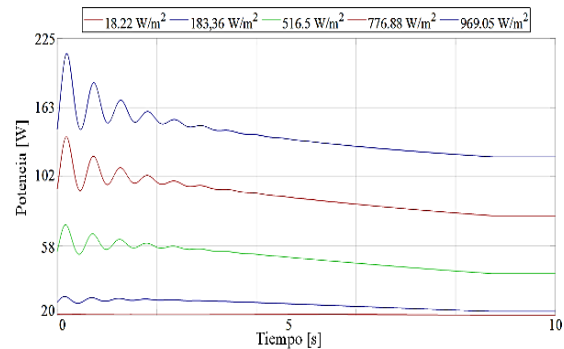


Figura 25. Potencia de salida del Motor CC.

Como se puede apreciar en la Figura 25, la potencia de salida del motor obedece a la misma tendencia de la potencia entregada por el panel fotovoltaico, sin embargo y dadas las pérdidas inherentes del motor, su potencia se disminuye aproximadamente un 1.7% , por tanto para la misma irradiancia de 969.05 W/m^2 , la potencia se estabiliza a los $141,94 \text{ W}$, lo cual está vinculado a la eficiencia del motor la cual es del 92% .

Ahora bien, la modelación consideró únicamente una altura de 1 metro para la extracción del agua para el sistema de bombeo, en tal sentido y tomando en cuenta los datos de placa de la bomba sumergible se puede señalar que la misma puede consumir una potencia de 15 kW a fin de extraer agua de una altura máxima de 30 metros con un caudal máximo de $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$. En este contexto y aplicando la formulación para evaluar la potencia en función del caudal y la altura y considerando que el sistema fotovoltaico puede incrementar su capacidad a través del MPPT, se obtiene la Figura 26, a

través de la cual se muestra que efectivamente existe una eficiencia en el bombeo usando el MPPT.

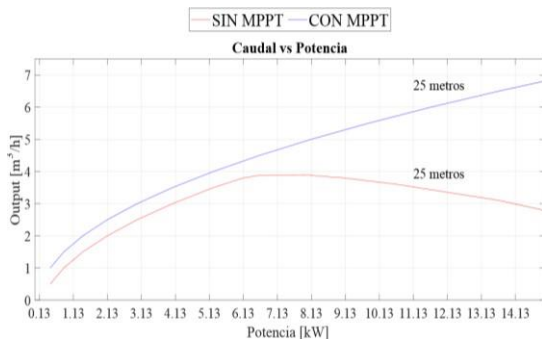


Figura 26. Caudal vs Potencia de salida del motor CC con y sin MPPT.

A fin de poder mostrar de forma explícita lo antes señalado, la Figura 27 presenta la en tres dimensiones en relación que tiene la potencia - caudal para diferentes longitudes de alcance para la bomba usando el sistema fotovoltaico incorporado MPPT, ratificándose nuevamente que el sistema modelado cumple con eficacia su objetivo permitiendo alcanzar una distancia mayor con un mayor caudal usando la potencia de salida del sistema fotovoltaico y afectada por la eficiencia de la bomba.

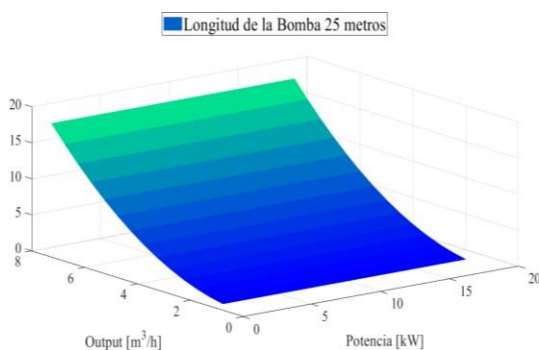


Figura 27. Caudal vs Potencia de salida del motor CC SFV con MPPT.

De lo analizado en las últimas figuras, se puede señalar que el sistema fotovoltaico puede incrementar su capacidad de tal forma que el motor pueda usar una potencia de 14.13 kW para una

altura de 25 metros, permitiendo de esta forma corroborar que el modelo usado para el sistema de bombeo cumple satisfactoriamente su diseño y que además no sobrepasa los límites impuestos por los datos de placa del motor CC.

6 Conclusiones

Del análisis cursado en el presente trabajo y en función del análisis de los resultados, se presentan los siguientes aspectos concluyentes:

Los sistemas de bombeo fotovoltaico corresponden a la interacción de diferentes elementos eléctricos y mecánicos que han sido analizados en el presente estudio, de los cuales se han determinado la importancia de cada uno de ellos, estableciéndose las características necesarias para la simulación correspondiente.

La modelación efectuada del sistema de bombeo fotovoltaico ha contemplado de forma general tres bloques, el primero asociado al sistema fotovoltaico, el segundo relacionado con el controlador y convertidor de potencia y el tercero asociado al motor CC y por ende al funcionamiento de la bomba. Bajo este contexto, cada uno de los bloques han sido modelados en MATLAB- Simulink. Para el caso del presente estudio, la modelación del controlador ha considerado la implementación del MPPT usando el algoritmo P&O, cuyos resultados de la simulación validaron la modelación desarrollada.

Al poder revisar la potencia de salida sin incluir el controlador a comparación de cuando se activa el MPPT, se deduce que la potencia de salida con el controlador incluido se trata de estabilizar en el tiempo, determinándose que la mayor entrega de potencia es cuando la irradiancia es de 969.05 W/m², lo que se

garantiza ya que el voltaje asciende a 28.7 V, lo cual permite llegar a las condiciones de máxima eficiencia del panel.

De los resultados analizados, se colige que el algoritmo P&O para garantizar el MPPT, presentó una respuesta satisfactoria dado que permite aprovechar la potencia que generan los paneles fotovoltaicos; así mismo es necesario señalar que dicho algoritmo responde de mejor manera el nivel de irradiancia de 969.05 W/m², sin perjuicio de lo citado, el modelado permite simular diferentes valores de irradiancia y temperatura.

Para irradiancias inferiores a los 776,88 W/m² se denota una ineficiencia en la entrega de potencia por parte del panel para cumplir con el abastecimiento de la bomba, teniendo un valor promedio de 73 kW, lo cual generaría que la bomba opere inadecuadamente e incluso tener problemas a nivel mecánico.

Como se ha citado, el modelado efectuado ha considerado los parámetros de cada uno de los elementos y sobre todo se ha incorporado el modelo P&O el cual a través del controlador de MPPT, garantiza eficiencia en la entrega de potencia al motor. Sin embargo, es necesario que al momento de la ejecución de este tipo de sistemas de bombeo fotovoltaico debe tomarse atención en el dimensionamiento e instalación de cada uno de los componentes, a fin de que dicho sistema sea sustentable en el tiempo.

La implementación de sistemas de bombeo fotovoltaicos de agua para el uso en zonas rurales es un aspecto que debe intensificarse paulatinamente ya que es factible técnica y económicamente. Actualmente, en ubicaciones remotas e inaccesibles sin electricidad de la red también dependen del sistema de bombeo convencional a base de electricidad o diésel, lo que resulta en un aumento de los costos recurrentes para los usuarios, por

tanto, la implementación de estos nuevos sistemas de bombeo ahonda en el beneficio de la población y reducen los costos.

6.1 Trabajos futuros

La evaluación de los resultados en este proceso de análisis y modelación constituyen una base para el desarrollo de nuevos estudios como:

Implementación de prototipos de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de contribución a poblaciones rurales.

Anexión de un convertidor Boost DC/DC como estrategia de control MPPT para sistemas fotovoltaicos.

Modelación de sistemas de riego mediante paneles fotovoltaicos usando control del tipo inalámbrico.

Simulación y modelado de sistemas de bombeo solar aplicado al área urbana en edificaciones residenciales.

Dimensionamiento óptimo para la implementación de sistemas de calentamiento de agua combinado con la unidad de bomba de calor para el suministro de agua caliente edificaciones residenciales usando energía solar.

Implementación de protocolos TCP / IP para el control de bombas de calor que usan el recurso solar.

Análisis integral a nivel económico y técnico de la implementación del sistema de bombeo de agua usando paneles fotovoltaicos.

7 Referencias

- [1] R. J. Chilundo, U. S. Mahanjane, and D. Neves, "Design and Performance of Photovoltaic Water Pumping Systems : Comprehensive Review towards a Renewable Strategy for Mozambique," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, pp. 32–63, 2018.

- [2] H. Singh, B. K. Saxena, and K. Rao, "Performance Study of a Solar Photovoltaic Water Pump used for Irrigation at Jaipur in Rajasthan , India," *IEEE Int. Conf. Neural Networks - Conf. Proc.*, pp. 3–8, 2017.
- [3] T. A. Khan, R. Ahmed, S. I. Ahmed, and S. I. Khan, "Design and Performance Analysis of Water Pumping Using Solar PV," *IEEE Syst. Journals*, pp. 5–8, 2008.
- [4] B. Sreewirote and M. Leelajindakrairerk, "Design and Development of Solar Water Pump," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, pp. 1–3, 2016.
- [5] S. S. Chandel, M. N. Naik, and R. Chandel, "Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1084–1099, 2015.
- [6] A. Ahmad, Z. Khan, and Dayanand, "Design & Simulation of Photovoltaic water pumping system and MPPT Algorithm in Simulink," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 539–543, 2015.
- [7] H. Acevedo, J. Mendoza, and S. Sepulveda, "Estrategias de control MPPT aplicadas en un convertidor DC/DC tipo boost para sistemas fotovoltaicos," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. May 2017, pp. 102–105, 2018.
- [8] M. A. Abella and F. C. Romero, "Sistemas de Bombeo Fotovoltaico," *Tesis*, vol. 2, pp. 6–22, 2009.
- [9] S. Li, J. Hu, D. Zhao, and T. An, "Research on optimal power ratio of solar photovoltaic pumping system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 2017–2020, 2019.
- [10] J. Jogunuri, D. Vyas, and V. Mehra, "Reconfiguration of Solar Photovoltaic Panels for Water Pumping Applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. Icssit, pp. 699–703, 2019.
- [11] S. R. Nath and R. Mndal, "Some Studies on Performance Analysis of Two Different Laboratory Scale Solar Photovoltaic Water Pumping in Irrigation Systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. March 2015, pp. 7–10, 2016.
- [12] A. Boutelhig and Y. Bakelli, "Comparative study on Water Max A 64 DC pump performances based Photovoltaic Pumping System design to select the optimum heads in arid area," *2012 IEEE 5th Power India Conf. PICONF 2012*, no. Icm, pp. 3–7, 2012.
- [13] L. Gevorkov and V. Šmídl, "Simulation Model for Efficiency Estimation of Photovoltaic Water Pumping System," *2015 North Am. Power Symp.*, no. March, pp. 18–20, 2020.
- [14] M. Meiqin, S. Jianhui, L. Chang, Z. Guorong, and L. Jidong, "Research on the performance of induction-motor-based residential photovoltaic water pump system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 1867–1870, 2008.
- [15] J. Hugale and M. Pance, "Single phase AC Drive for Isolated Solar Photovoltaic Water Pumping System," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 1285–1287, 2015.
- [16] R. A. Ardiansyah, M. Luthfi, and C. Hudaya, "Performance Analysis of Solar-Powered Submersible DC Water Pump," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 5–9, 2019.
- [17] B. Sreewirote, A. Noppakant, and

- C. Pothisarn, "Performance and Economic Analysis of Solar Water Pump System," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. 1, pp. 2–6, 2017.
- [18] M. Ramesh *et al.*, "Micro Water Distribution Networks: A Participatory Method of Sustainable Water Distribution in Rural Communities," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–3, 2016.
- [19] A. Tian, B. Yan, N. Dong, A. Tian, and A. Jiang, "Study of water resource sustainable development," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, pp. 3655–3658, 2011.
- [20] B. Alomar and A. Alazzam, "A Smart Irrigation System Using IoT and Fuzzy Logic Controller," *Electr. power Eng. Ser.*, pp. 175–179, 2018.
- [21] B. Hiller, W. Marcus, B. Augeard, C. Ward, and P. Huntjens, "Understanding and Improving Groundwater Governance," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, no. June, pp. 2–10, 2012.
- [22] T. Shah, "Climate change and groundwater: India's opportunities for mitigation and adaptation," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, pp. 2–5, 2009.
- [23] P. Kumar, S. Rathore, and D. Chauhan, "Perspectives of solar photovoltaic water pumping for irrigation in India," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 22, no. November, pp. 385–395, 2018.
- [24] B. Eker, "Solar powered water pumping systems," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 3, no. 7, pp. 7–11, 2005.
- [25] N. I. Sarkar and H. R. Ghosh, "Techno-economic analysis and challenges of solar powered pumps dissemination in Bangladesh," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 20, pp. 33–46, 2017.
- [26] P. Elia, H. Li, and J. Yan, "Techno-economic feasibility of the irrigation system for the grassland and farmland conservation in China: Photovoltaic vs . wind power water pumping," *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 103, pp. 311–320, 2015.
- [27] J. Zhang, Z. Qi, and J. Wen, "Control of water pumping driven by wind turbine based on Quasi Z source inverter," *Proc. - 2017 Chinese Autom. Congr. CAC 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 7074–7077, 2017.
- [28] J. W. Powell, J. M. Welsh, and R. Farquharson, "Investment analysis of solar energy in a hybrid diesel irrigation pumping system in New South Wales , Australia," *J. Clean. Prod.*, vol. 224, pp. 444–454, 2019.
- [29] O. S. Ohunakin, M. S. Adaramola, O. M. Oyewola, and R. O. Fagbenle, "Solar energy applications and development in Nigeria: Drivers and barriers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 294–301, 2014.
- [30] A. Kumar *et al.*, "Field experiences with the operation of solar radiation resource assessment stations in India," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 2351–2361, 2014.
- [31] X. Gao *et al.*, "Feasibility evaluation of solar photovoltaic pumping irrigation system based on analysis of dynamic variation of groundwater table," *Appl. Energy*, vol. 105, pp. 182–193, 2013.
- [32] A. Mehmood, A. Waqas, and H. Tahira, *Economic viability of solar photovoltaic water pump for sustainable agriculture growth in*

- Pakistan*, vol. 2, no. 10. Elsevier Ltd., 2015.
- [33] J. W. Heard *et al.*, “The economics of subsurface drip irrigation on perennial pastures and fodder production in Australia,” *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 68–78, 2012.
- [34] M. Benghanem, K. O. Daffallah, S. N. Alamri, and A. A. Joraid, “Effect of pumping head on solar water pumping system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 334–339, 2014.
- [35] H. A. Kazem, T. Khatib, and K. Sopian, “Sizing of a standalone photovoltaic / battery system at minimum cost for remote housing electrification in Sohar , Oman,” *Energy Build.*, vol. 61, pp. 108–115, 2013.
- [36] A. Kaabeche and R. Ibtouen, “ScienceDirect Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic / wind / diesel / battery generation in a stand-alone power system,” *Sol. Energy*, vol. 103, pp. 171–182, 2014.
- [37] L. Nabila, F. Khaldi, and M. Aksas, “Design of photovoltaic pumping system using water tank storage for a remote area in Algeria,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 2–5, 2014.
- [38] A. Chauhan and R. P. Saini, “A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Con fi gurations , storage options , sizing methodologies and control,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 99–120, 2014.
- [39] S. Shokrolla, “A photovoltaic powered separately excited DC motor drive for rural/desert pump irrigation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, p. 2, 1993.
- [40] K. A. Sado, L. Hassan, and MoghavvemiM, “Design of a PV-powered DC water pump system for irrigation: a case study,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 1–6, 2018.
- [41] J. Victor *et al.*, “Implementation of a High-Efficiency , High-Lifetime , and Low-Cost Converter for an Autonomous Photovoltaic Water Pumping System,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 50, no. 1, pp. 631–641, 2014.
- [42] P. E. Campana, H. Li, J. Zhang, R. Zhang, J. Liu, and J. Yan, “Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 95, pp. 32–41, 2015.
- [43] Y. Shen, S. Li, Y. Chen, Y. Qi, and S. Zhang, “Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989 – 2010,” *Agric. Water Manag.*, vol. 128, pp. 55–64, 2013.
- [44] K. Kumar and M. Nishat, “Solar Photovoltaic based Brushless DC Motor Driven Water Pumping System using PSO-MPPT Algorithm,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 0–5, 2019.
- [45] F. E. Tahiri, K. Chikh, M. Khafallah, and A. Saad, “Comparative study between two Maximum Power Point Tracking techniques for Photovoltaic System,” *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, p. 2, 2016.
- [46] L. Gonzalez, “Estudio de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos,” *Tesis*, vol. 1, pp. 66–72, 2018.
- [47] J. Ahmed, S. Member, and Z.

- Salam, “A Modified P & O Maximum Power Point Tracking Method With Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 7, no. 4, pp. 1506–1515, 2016.
- [48] Soltech, “Solar panel 1STH-215-P Soltech.” [Online]. Available: http://www.posharp.com/1sth-215-p-solar-panel-from-1soltech_p1621902445d.aspx. [Accessed: 30-Jul-2020].
- [49] L. . Ruiz, J. J. Beristáin, I. . Sosa, and J. L. Hernandez, “Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar,” *Rev. Ing. eléctrica, electrónica y Comput.*, vol. 8, no. 1, p. 7, 2010.
- [50] Secretaría de Ambiente - Municipio de Quito, “índice Quiteño de Calidad del Aire (IQCA),” 2020. [Online]. Available: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/indice-de-calidad-del-aire-2>. [Accessed: 30-Jul-2020].

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 7. Matriz de estado del arte

| DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO DE PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|---|-------|---|---------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---------------------------------------|---|--|--|---|---|--|---|--|---|---|
| ITEM | AÑO | TÍTULO DEL ARTÍCULO | CITAS | TEMÁTICA | | | | FORMULACION DEL PROBLEMA | | | | | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA | | | ALGORITMO DE RESOLUCIÓN | | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | | |
| | | | | Abastecimiento de agua mediante sistema de bombeo | Sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos | Simulación de sistemas de bombeo fotovoltaico | Fuentes de energía alternativas para el bombeo de agua | Implementación de sistemas de bombeo alternativos | Uso de la energía fotovoltaica en de bombeo de agua | Métodos para el aprovechamiento del recurso alternativo | Modelación matemática de los componentes de sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del recurso alternativo | Evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico | Medición y evaluación del recurso energético | Suministro eléctrico escaso en zonas rurales | Determinación de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Establecimiento de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Modelación de los componentes del sistema de bombeo, | Simulación del sistema de bombeo fotovoltaico | Evaluación del modelado de los componentes del sistema de bombeo | Modelo del sistema de bombeo fotovoltaico en Matlab | Implementación del punto de máxima potencia mediante el algoritmo P&O |
| 1 | 2018 | Design and Performance of Photovoltaic Water Pumping Systems : Comprehensive Review towards a Renewable Strategy for Mozambique | 3 | ✘ | | ✘ | ✘ | | ✘ | | ✘ | | ✘ | ✘ | | | ✘ | | | | | | |
| 2 | 2017 | Performance Study of a Solar Photovoltaic Water Pump used for Irrigation at Jaipur in Rajasthan , India | 3 | | ✘ | | | ✘ | | | ✘ | | ✘ | ✘ | | | | | | | | | |
| 3 | 2012 | Design and Performance Analysis of Water Pumping Using Solar PV | 21 | ✘ | ✘ | ✘ | | | ✘ | ✘ | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ |
| 4 | 2016 | Design and Development of Solar Water Pump | 1 | | ✘ | ✘ | | ✘ | | ✘ | | ✘ | ✘ | | | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ | | ✘ |
| 5 | 2015 | Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies | 256 | | | ✘ | | ✘ | | | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ | | | ✘ | ✘ | | | | ✘ | |
| 6 | 2005 | Design & Simulation of Photovoltaic water pumping system and MPPT Algorithm in Simulink | 212 | | ✘ | ✘ | ✘ | | ✘ | | | ✘ | ✘ | | | | | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ |
| 7 | 2018 | Estrategias de control MPPT aplicadas en un convertidor DC/DC tipo boost para sistemas fotovoltaicos | 2 | | ✘ | ✘ | ✘ | | | ✘ | | | ✘ | ✘ | | | | ✘ | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ |
| 8 | 2009 | Sistemas de Bombeo Fotovoltaico | 6 | | | | | | | | | | ✘ | ✘ | | ✘ | | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ |
| 9 | 2019 | Research on optimal power ratio of solar photovoltaic pumping system | 0 | ✘ | | | | | | | | | ✘ | ✘ | | ✘ | | ✘ | | | | | ✘ |

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO DE PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O

| ITEM | DATOS | | TEMÁTICA | | | | | FORMULACION DEL PROBLEMA | | | | | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA | | | ALGORITMO DE RESOLUCIÓN | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | | | | |
|------|-------|--|----------|---|---------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---------------------------------------|---|--|--|---|---|--|---|--|---|---|--|
| | AÑO | TÍTULO DEL ARTÍCULO | CITAS | Abastecimiento de agua mediante sistema de bombeo | Sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos | Simulación de sistemas de bombeo fotovoltaico | Fuentes de energía alternativas para el bombeo de agua | Implementación de sistemas de bombeo alternativos | Uso de la energía fotovoltaica en de bombeo de agua | Métodos para el aprovechamiento del recurso alternativo | Modelación matemática de los componentes de sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del recurso alternativo | Evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico | Medición y evaluación del recurso energético | Suministro eléctrico escaso en zonas rurales | Determinación de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Establecimiento de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Modelación de los componentes del sistema de bombeo, | Simulación del sistema de bombeo fotovoltaico | Evaluación del modelado de los componentes del sistema de bombeo | Modelo del sistema de bombeo fotovoltaico en Matlab | Implementación del punto de máxima potencia mediante el algoritmo P&O | Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema de bombeo fotovoltaico |
| 10 | 2019 | Reconfiguration of Solar Photovoltaic Panels for Water Pumping Applications | 0 | ☒ | ☒ | | ☒ | | ☒ | | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | | | ☒ | ☒ | ☒ | | | ☒ |
| 11 | 2016 | Some Studies on Performance Analysis of Two Different Laboratory Scale Solar Photovoltaic Water Pumping in Irrigation Systems | 2 | | | ☒ | ☒ | | | | | | ☒ | ☒ | | ☒ | | | | ☒ | | | | ☒ |
| 12 | 2012 | Comparative study on Water Max A 64 DC pump performances based Photovoltaic Pumping System design to select the optimum heads in arid area | 4 | | | ☒ | | | | ☒ | | | | | | | | | | | | | ☒ | ☒ |
| 13 | 2020 | Simulation Model for Efficiency Estimation of Photovoltaic Water Pumping System | 0 | ☒ | ☒ | | ☒ | | | | | | | ☒ | | ☒ | | | | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ |
| 14 | 2008 | Research on the performance of induction- motor-based residential photovoltaic water pump system | 2 | ☒ | | ☒ | | ☒ | | | ☒ | | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ |
| 15 | 2008 | Single phase AC Drive for Isolated Solar Photovoltaic Water Pumping System | 2 | ☒ | | ☒ | | ☒ | | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | | ☒ | | ☒ | | ☒ | |
| 16 | 2019 | Performance Analysis of Solar-Powered Submersible DC Water Pump | 0 | ☒ | ☒ | | | ☒ | ☒ | | | ☒ | | ☒ | ☒ | | ☒ | | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ |
| 17 | 2017 | Performance and Economic Analysis of Solar Water Pump System | 3 | | | ☒ | | | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | | | ☒ | ☒ | | ☒ | |
| 18 | 2018 | Micro Water Distribution Networks : A Participatory Method of Sustainable Water Distribution in Rural Communities | 8 | ☒ | ☒ | | | | ☒ | | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | | | ☒ | ☒ | |
| 19 | 2011 | Study of water resource sustainable development | 2 | ☒ | | ☒ | | ☒ | | | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | | | | | ☒ | |
| 20 | 2018 | A Smart Irrigation System Using IoT and Fuzzy Logic Controller | 6 | | | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | |

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO DE PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O

| ITEM | DATOS | | | TEMÁTICA | | | | | FORMULACION DEL PROBLEMA | | | | | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA | | | ALGORITMO DE RESOLUCIÓN | | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | | |
|------|-------|--|-------|---|---------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---------------------------------------|---|--|--|---|---|--|---|--|---|---|--|
| | AÑO | TÍTULO DEL ARTÍCULO | CITAS | Abastecimiento de agua mediante sistema de bombeo | Sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos | Simulación de sistemas de bombeo fotovoltaico | Fuentes de energía alternativas para el bombeo de agua | Implementación de sistemas de bombeo alternativos | Uso de la energía fotovoltaica en de bombeo de agua | Métodos para el aprovechamiento del recurso alternativo | Modelación matemática de los componentes de sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del recurso alternativo | Evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico | Medición y evaluación del recurso energético | Suministro eléctrico escaso en zonas rurales | Determinación de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Establecimiento de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Modelación de los componentes del sistema de bombeo, | Simulación del sistema de bombeo fotovoltaico | Evaluación del modelado de los componentes del sistema de bombeo | Modelo del sistema de bombeo fotovoltaico en Madiab | Implementación del punto de máxima potencia mediante el algoritmo P&O | Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema de bombeo fotovoltaico |
| 21 | 2012 | Understanding and Improving Groundwater Governance | 56 | | ✗ | | ✗ | | | ✗ | | ✗ | | ✗ | | | | | ✗ | | | ✗ | | |
| 22 | 2009 | Climate change and groundwater: India's opportunities for mitigation and adaptation | 267 | | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | | ✗ | | ✗ | | | | | ✗ | | | ✗ | | |
| 23 | 2018 | Perspectives of solar photovoltaic water pumping for irrigation in India | 10 | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | | |
| 24 | 2005 | Solar powered water pumping systems | 58 | ✗ | | ✗ | | ✗ | | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | ✗ | |
| 25 | 2017 | Techno-economic analysis and challenges of solar powered pumps dissemination in Bangladesh | 13 | ✗ | | ✗ | | ✗ | | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ |
| 26 | 2015 | Techno-economic feasibility of the irrigation system for the grassland and farmland conservation in China: Photovoltaic vs. wind power water pumping | 46 | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | | ✗ | | | | | | | ✗ | ✗ | | ✗ |
| 27 | 2015 | Investment analysis of solar energy in a hybrid diesel irrigation pumping system in New South Wales, Australia | 47 | | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | | | ✗ | ✗ | | | | | | | ✗ | ✗ | | ✗ |
| 28 | 2014 | Solar energy applications and development in Nigeria: Drivers and barriers | 165 | | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | | | | | | ✗ | ✗ | | ✗ |
| 29 | 2014 | Field experiences with the operation of solar radiation resource assessment stations in India | 31 | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | ✗ |
| 30 | 2013 | Feasibility evaluation of solar photovoltaic pumping irrigation system based on analysis of dynamic variation of groundwater table | 53 | ✗ | ✗ | | | ✗ | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | ✗ |
| 31 | 2015 | Economic viability of solar photovoltaic water pump for sustainable agriculture growth in Pakistan | 10 | ✗ | | ✗ | | ✗ | | | ✗ | | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ |

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO DE PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O

| ITEM | AÑO | TÍTULO DEL ARTÍCULO | CITAS | TEMÁTICA | | | | | FORMULACION DEL PROBLEMA | | | | | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA | | | ALGORITMO DE RESOLUCIÓN | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | | |
|------|------|--|-------|---|---------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---------------------------------------|---|--|--|---|---|--|---|--|---|---|
| | | | | Abastecimiento de agua mediante sistema de bombeo | Sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos | Simulación de sistemas de bombeo fotovoltaico | Fuentes de energía alternativas para el bombeo de agua | Implementación de sistemas de bombeo alternativos | Uso de la energía fotovoltaica en de bombeo de agua | Métodos para el aprovechamiento del recurso alternativo | Modelación matemática de los componentes de sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del recurso alternativo | Evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico | Medición y evaluación del recurso energético | Suministro eléctrico escaso en zonas rurales | Determinación de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Establecimiento de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Modelación de los componentes del sistema de bombeo, | Simulación del sistema de bombeo fotovoltaico | Evaluación del modelado de los componentes del sistema de bombeo | Modelo del sistema de bombeo fotovoltaico en Madiab | Implementación del punto de máxima potencia mediante el algoritmo P&O |
| 32 | 2012 | The economics of subsurface drip irrigation on perennial pastures and fodder production in Australia | 18 | ✗ | ✗ | | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | | |
| 33 | 2014 | Effect of pumping head on solar water pumping system | 69 | ✗ | ✗ | | | | | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ |
| 34 | 2013 | Sizing of a standalone photovoltaic / battery system at minimum cost for remote housing electrification in Sohar , Oman | 112 | ✗ | | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | | |
| 35 | 2014 | Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic / wind / diesel / battery generation in a stand-alone power system | 189 | ✗ | | ✗ | | ✗ | | | | | | ✗ | | ✗ | ✗ | | ✗ | | | ✗ | |
| 36 | 2014 | Design of photovoltaic pumping system using water tank storage for a remote area in Algeria | 9 | | ✗ | | ✗ | | | | | ✗ | ✗ | | | | | ✗ | | ✗ | ✗ | | ✗ |
| 37 | 2014 | A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications : Con fi gurations , storage options , sizing methodologies and control | 162 | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | ✗ | | ✗ | ✗ | | | | | | | ✗ | |
| 38 | 1993 | A photovoltaic powered separately excited DC motor drive for rural/desert pump irrigation | 2 | | | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | |
| 39 | 2018 | Design of a PV-powered DC water pump system for irrigation : a case stud | 1 | | | | ✗ | ✗ | ✗ | | | | ✗ | | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| 40 | 2013 | Implementation of a High-Efficiency , High-Lifetime , and Low-Cost Converter for an Autonomous Photovoltaic Water Pumping System | 160 | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | ✗ | | | | | | | | |
| 41 | 2015 | Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation | 106 | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | | | | ✗ | ✗ | | | | ✗ |

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO EL ALGORITMO DE PERTURBACIÓN OBSERVACIÓN P&O

| ITEM | AÑO | TÍTULO DEL ARTÍCULO | CITAS | TEMÁTICA | | | | | | FORMULACION DEL PROBLEMA | | | | | | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA | | ALGORITMO DE RESOLUCIÓN | | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | | |
|-----------|------|--|-------|---|---------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---------------------------------------|---|--|--|---|---|--|---|--|---|---|--|--|
| | | | | Abastecimiento de agua mediante sistema de bombeo | Sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos | Simulación de sistemas de bombeo fotovoltaico | Fuentes de energía alternativas para el bombeo de agua | Implementación de sistemas de bombeo alternativos | Uso de la energía fotovoltaica en de bombeo de agua | Métodos para el aprovechamiento del recurso alternativo | Modelación matemática de los componentes de sistemas de bombeo fotovoltaico | Determinación del recurso alternativo | Evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico | Medición y evaluación del recurso energético | Suministro eléctrico escaso en zonas rurales | Determinación de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Establecimiento de los parámetros de cada elemento del sistema de bombeo fotovoltaico | Modelación de los componentes del sistema de bombeo, | Simulación del sistema de bombeo fotovoltaico | Evaluación del modelado de los componentes del sistema de bombeo | Modelo del sistema de bombeo fotovoltaico en Matlab | Implementación del punto de máxima potencia mediante el algoritmo P&O | Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema de bombeo fotovoltaico | Uso de recursos alternativo para el bombeo de agua |
| 42 | 2013 | Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989 – 2010 | 101 | ✗ | ✗ | | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | |
| 43 | 2019 | Solar Photovoltaic based Brushless DC Motor Driven Water Pumping System using PSO-MPPT Algorithm | 0 | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | |
| 44 | 2016 | Comparative study between two Maximum Power Point Tracking techniques for Photovoltaic System | 10 | | ✗ | ✗ | ✗ | | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | |
| 45 | 2018 | Estudio de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos | 0 | | | ✗ | ✗ | | | | | | ✗ | | | | | | | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | |
| 46 | 2016 | A Modified P & O Maximum Power Point Tracking Method With Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency | 186 | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | |
| CANTIDAD: | | | | 25 | 24 | 25 | 21 | 21 | 21 | 28 | 19 | 21 | 21 | 27 | 28 | 21 | 25 | 15 | 18 | 21 | 22 | 30 | 27 | 26 | 28 |

7.2 Resumen de Indicadores

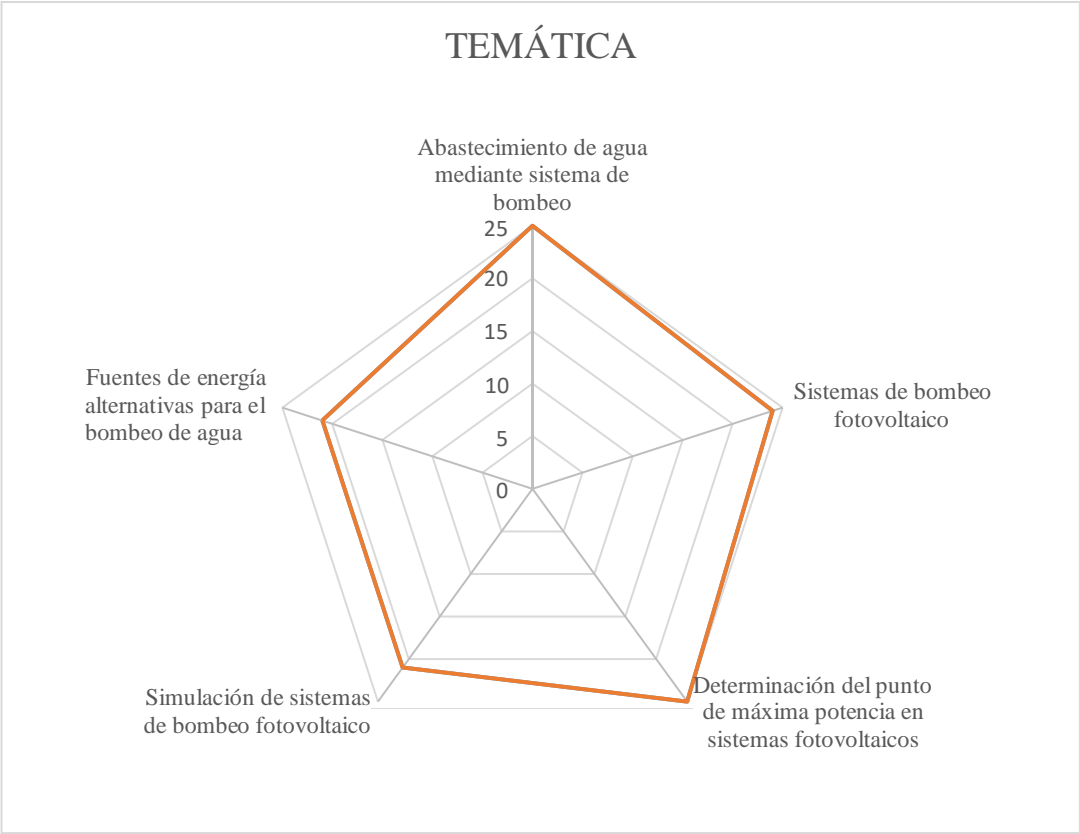


Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

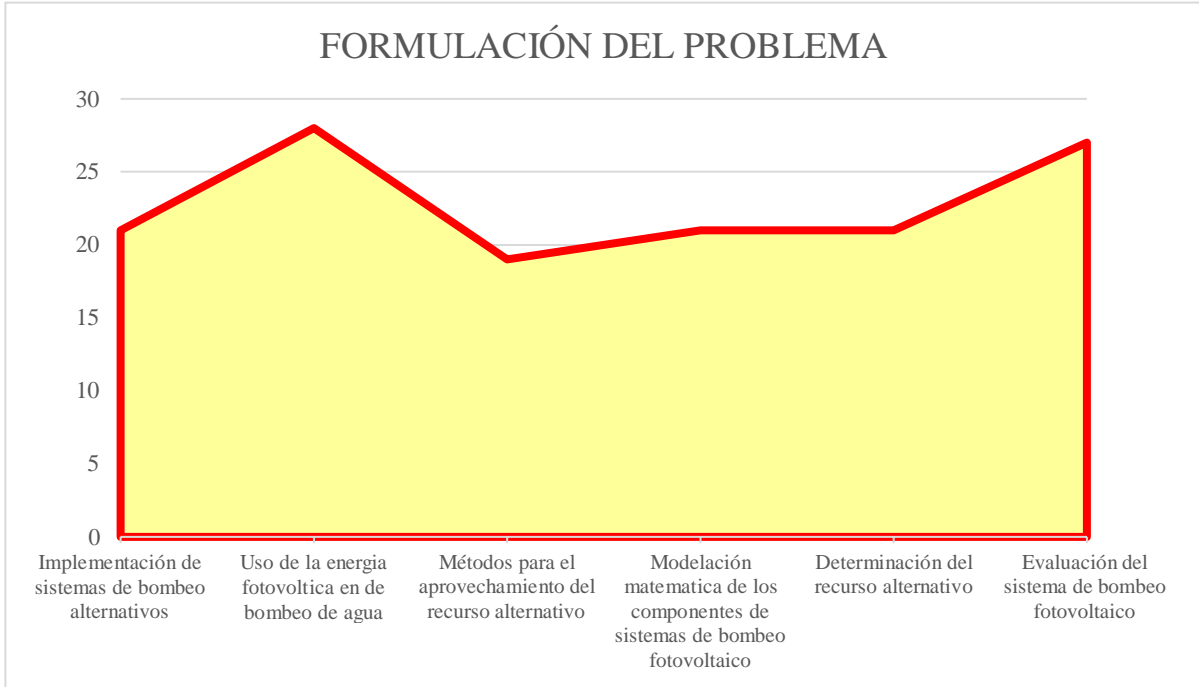


Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

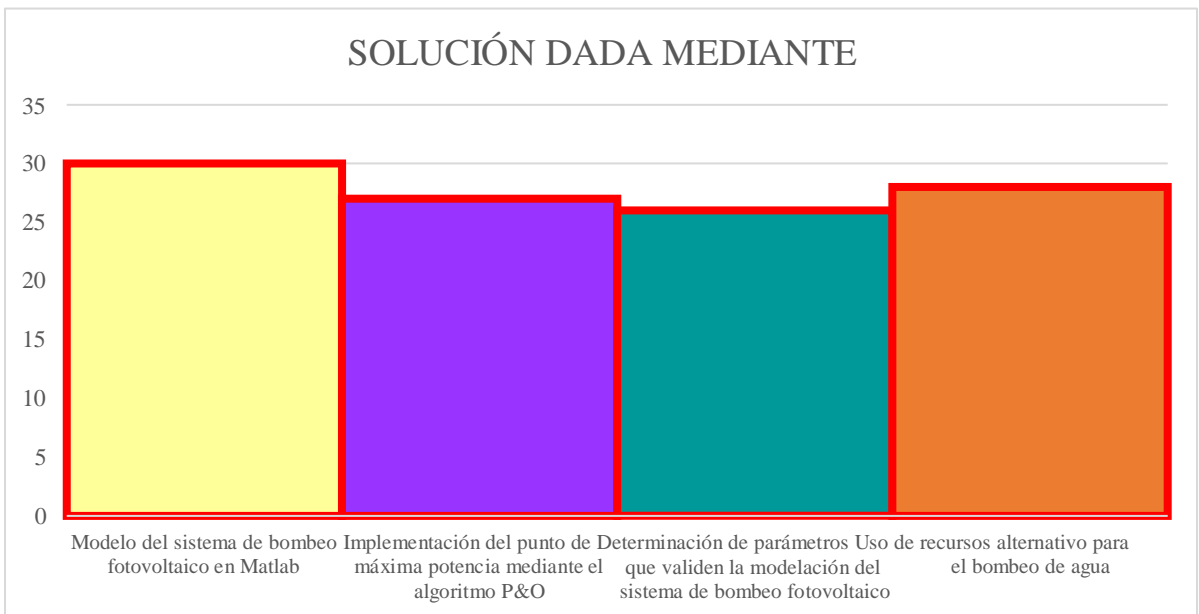


Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte.