

**USS | UNIVERSIDAD
SEÑOR DE SIPÁN**
**FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA
Y URBANISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA**

TESIS

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR
DIRECTO PARA RIEGO POR GOTEO EN EL
DISTRITO DE GUADALUPITO – LA LIBERTAD**

**PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA**

Autor:

Bach. Jara Toro, Henry James

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9374-1224>

Asesor:

Mg. Ing. Vives Garnique, Juan Carlos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0988-9881>

Línea de Investigación:

Infraestructura, Tecnología y Medio Ambiente

Pimentel – Perú

2021

(Aprobación del Jurado)

TITULO DE LA INVESTIGACIÓN
DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR DIRECTO PARA RIEGO
POR GOTEO EN EL DISTRITO DE GUADALUPITO – LA LIBERTAD

APROBACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Mg. Ing. Vives Garnique, Juan Carlos

Asesor Metodológico

Mg. Ing. Gastiaburú Morales, Silvia Yvone

Presidente del jurado de tesis

Mg. Ing. Alvarado Silva, Carlos Alexis

Secretario del jurado de tesis

Mg. Ing. Vives Garnique, Juan Carlos

Vocal del jurado de tesis

Dedicatoria

A Dios con amor ferviente

A mi padre Santos y mi madre Agustina con todo el cariño que habita en mí hacia ellos.

A mi esposa Esther, a mis hijos Amy Valentina, Samira Estrella y Renato James con el amor más grande de todos que representa la familia.

Agradecimiento

A mi Maestra Flor Delicia Heredia Llatas, por compartir el conocimiento con quienes buscamos el desarrollo de este proyecto, por su apoyo y motivación constantes.

A los docentes de esta casa de estudios, por su valioso aporte en materia académica hacia mi formación como profesional.

RESUMEN

El trabajo de investigación que aquí se expone tiene como objetivo principal elaborar el diseño de un sistema de bombeo solar directo con la finalidad de satisfacer la demanda de riego por goteo requerido por los sembríos de palto en 7 hectáreas en el distrito de Guadalupe – departamento de La Libertad, 2021. El desarrollo del proyecto que aquí se expone se basa en la fundamentación teórica sobre sistemas fotovoltaicos autónomos y los cálculos matemáticos con las ecuaciones que en el marco teórico se presentan. La data de irradiación solar se recoge de la plataforma digital PVGIS y la bomba se selecciona considerando los cálculos, así como las diversas fichas técnicas que existen en el mercado. La investigación tiene un enfoque cuantitativo, es de tipo aplicada no experimental y descriptiva.

Los primeros resultados obtenidos en la investigación llevan a concluir que, los valores de irradiación fluctúan de 4.72 kWh/m²/día en el mes de junio hasta 6.66 kWh/m²/día en el mes de marzo para una superficie con inclinación de 15°. El criterio que se aplica es para el mes con mayor demanda hídrica, es decir, el mes de febrero, el cual posee una irradiación de 5.90 kWh/m²/día. Con esta irradiación se debe suplir la demanda hídrica máxima durante el año, 1029 l/min, lo que corresponde a una demanda energética de 29.1 kWh/día y potencia de bomba en 7.5 kW.

Finalmente, el generador fotovoltaico para bombeo de agua debe contar con 28 paneles de 370 Wp conectados 14 en serie y 2 strings en paralelo; 1 controlador de carga de 22 A y 540 VCD de entrada del sistema solar y salida 380/400/415/440 VAC; 1 electrobomba sumergible de carga dinámica total 27.5 m y flujo de agua máximo 1000 l/min para satisfacer la demanda de recurso hídrico.

Palabras clave: irradiación, recurso hídrico, bombeo solar, paneles, electrobomba, caudal.

ABSTRACT

The main objective of the research work presented here is to design a direct solar pumping system in order to satisfy the demand for drip irrigation required by avocado crops in 7 hectares in the district of Guadalupe - department of La Libertad, 2021. The development of the project presented here is based on the theoretical foundation on autonomous photovoltaic systems and the mathematical calculations with the equations that are presented in the theoretical framework. The solar irradiation data is collected from the PVGIS digital platform and the pump is selected considering the calculations, as well as the various technical sheets that exist on the market. The research has a quantitative approach, it is of an applied, non-experimental and descriptive type.

The first results obtained in the research lead to the conclusion that irradiation values fluctuate from 4.72 kWh / m² / day in June to 6.66 kWh / m² / day in March for a surface with a 15 ° inclination. The criterion that is applied is for the month with the highest water demand, that is, the month of February, which has an irradiation of 5.90 kWh / m² / day. With this irradiation, the maximum water demand during the year, 1029 l / min, must be supplied, which corresponds to an energy demand of 29.1 kWh / day and pump power of 7.5 kW.

Finally, the photovoltaic generator for pumping water must have 28 panels of 370 Wp connected 14 in series and 2 strings in parallel; 1 x 22A 540VDC solar system input and 380/400/415/440 VAC output charge controller; 1 submersible electric pump with a total dynamic load of 27.5 m and maximum water flow 1000 l / min to satisfy the demand for water resources.

Keywords: irradiation, water resource, solar pumping, panels, electric pump, flow.

ÍNDICE

Caratula	
Aprobación del Jurado	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
Índice de Tablas	ix
Índice de figuras.....	ix
I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad Problemática.....	11
1.2. Antecedentes de estudio	18
1.3. Marco teórico	28
1.3.1. Energía solar	28
1.3.2. Tecnologías de aprovechamiento solar.....	29
1.3.3. Fundamentos de energía solar.....	30
1.3.4. La celda solar	38
1.3.5. Sistemas solares fotovoltaicos	44
1.3.6. Diseño general de un sistema fotovoltaico aislado.....	54
1.3.7. Diseño de sistema fotovoltaico de bombeo.....	64
1.3.8. Evaluación económica.....	67
1.4. Formulación del problema.....	69
1.5. Justificación e importancia del estudio	69
1.6. Hipótesis.....	70
1.7. Objetivos	71
1.7.1. Objetivo general	71
1.7.2. Objetivos específicos.....	71
II. MATERIAL Y MÉTODOS	72
2.1. Tipo y diseño de investigación.....	72
2.2. Población y muestra.....	72
2.3. Variables, Operacionalización	72
2.3.1. Variables.....	72
2.3.2. Operacionalización.....	72

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.....	74
2.5. Procedimiento de análisis de datos.....	74
2.6. Criterios éticos.....	74
2.7. Criterios de rigor científico.....	74
III. RESULTADOS.....	76
3.1. Cálculos.....	76
3.1.1. Ubicación y evaluación del recurso solar.....	76
3.1.2. Determinación de la demanda energética.....	78
3.1.3. Dimensionamiento de sistema de bombeo solar.....	81
3.1.4. Evaluación económica.....	87
3.2. Presentación de los resultados.....	88
3.3. Discusión.....	91
3.4. Aporte práctico.....	94
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
4.1. Conclusiones.....	96
4.2. Recomendaciones.....	97
V. REFERENCIAS.....	98
ANEXO.....	109

Índice de Tablas

Tabla 1. Ángulo de inclinación en función de latitud	55
Tabla 2. Valores de parámetros recomendados	58
Tabla 3. Voltaje para sistemas fotovoltaicos	60
Tabla 4. Ubicación y condiciones climatológicas en lugar del proyecto	76
Tabla 5. Irradiación y horas solar pico en el distrito de Guadalupe a 15° ...	77
Tabla 6. Estimación de volúmenes de agua a aplicar en paltos maduros....	79
Tabla 7. Demanda de agua por mes de acuerdo a demanda unitaria	80
Tabla 8. Ficha técnica de bomba seleccionada	82
Tabla 9. Resultados obtenidos de selección de panel solar	84
Tabla 10. Magnitudes corregidas	85
Tabla 11. Costo de componentes de sistema de bombeo solar.....	87
Tabla 12. Especificaciones de la bomba sumergible calculada	88
Tabla 13. Componentes de Sistema fotovoltaico	89
Tabla 14. Resultados obtenidos de selección de panel solar	90
Tabla 15. Resultados de regulador/inversor	90

Índice de figuras

Figura 1. Proyección mundial de producción de energía fotovoltaica	12
Figura 2. Tipos de centrales solares térmicas.....	29
Figura 3. Ángulos en el movimiento solar relativo	31
Figura 4. Sistema Tierra – Sol y constante solar.....	32
Figura 5. Componentes de la radiación solar.....	34
Figura 6. Irradiancia en un día soleado normal y horas solar pico	35
Figura 7. Tipos de seguidores solares	38
Figura 8. Efecto fotovoltaico.....	39
Figura 9. Celda solar fotovoltaica.....	40

Figura 10. La curva característica I – V de una celda solar ideal (a) y la energía producida por la celda (b). La potencia generada en el punto de máxima potencia es igual al rectángulo sombreado en (a).....	42
Figura 11. Curva característica I – V de celdas reales e ideales bajo diferentes niveles de iluminación.	43
Figura 12. Potencia versus voltaje para una celda fotovoltaica para cuatro niveles de iluminación.	43
Figura 13. Dependencia de la temperatura de la curva de potencia versus voltaje para una celda fotovoltaica	44
Figura 14. Sistema conectado a red	47
Figura 15. Sistema de bombeo solar sin sistema de almacenamiento	48
Figura 16. Elementos básicos de instalación autónoma	48
Figura 17. Componentes de sistema de bombeo solar.....	51
Figura 18. Componentes de una bomba centrífuga	52
Figura 19. Instalación de bombeo con bomba sumergible	53
Figura 20. Curva característica de una bomba centrífuga	54
Figura 21. Ángulo de inclinación de panel fotovoltaico (tilt angle).....	55
Figura 22. Curva característica de bomba sumergible Pedrollo 6SR 225G/150	83

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática

El cambio climático y la necesidad de electrificar lugares remotos y aislados de la red convencional han propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías de generación eléctrica, ya maduras y bastante comunes en muchos países del mundo, como la fotovoltaica y también la eólica, las cuales no solo son capaces de brindar electricidad domiciliaria sino también representan fuente de energía eléctrica para sistemas de bombeo de agua (energía solar fotovoltaica y eólica) o fuente de calor en sistemas de calefacción (energía solar); sin embargo, Ponce y Ramos (2021) indican que en nuestro país existe una escasa utilización de este recurso energético.

La energía solar fotovoltaica además de contribuir con el desarrollo de la población suministrando acceso al servicio eléctrico, contribuye al decremento de la huella de carbono. En cuanto a costos, la disminución gradual que se da año a año en el costo de fabricación de módulos fotovoltaicos va emparejando el terreno de costos en comparación a otras fuentes de energía económicas y consecuentemente la tecnología solar se vuelve más competitiva.

IRENA, citado por OSINERGMIN (2019) afirma que uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) es lograr el acceso global al servicio de energía eléctrica para el año 2030, es por esta razón que los países comprometidos con ello han empleado ya diversos mecanismos que permitan incrementar el acceso a este servicio en localidades rurales.

Esta investigación busca diseñar un sistema fotovoltaico como aprovisionamiento de energía eléctrica para accionar una electrobomba encargada de impulsar agua para riego agrícola, esto como propuesta de solución a la problemática de desabastecimiento de electricidad en la zona, permitiendo ello una mejora en la explotación de los recursos energéticos ya que se reemplazaría el sistema actual que emplea una motobomba accionada con combustible, además de obtener beneficios económicos en un largo plazo.

Internacional

Por el lado de los precios, a nivel internacional se ha dado una fuerte caída de ellos, tal y como lo resaltó la AIE en 2016 al señalar a la energía fotovoltaica como una de las menos costosas para generación de electricidad lo que ha permitido también su fuerte crecimiento (Roca, 2016).

Los 3 mayores mercados solares en 2020 fueron China, 48,2 GW; EEUU, 19,2 GW y Vietnam, 11,6 GW. Solar Power Europe proyecta que la energía solar está en camino de agregar 163 GW en 2021, 203 GW en 2022, 225 GW en 2023, 239 GW en 2024 y 266 GW en 2025. (Roca, 2021).

El sistema de bombeo solar fotovoltaico para fines agrícolas ha ganado importancia en los últimos tiempos teniendo en cuenta sus características respetuosas con el medio ambiente y para reducir la subordinación de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles para bombeo. En general, los sistemas de bombeo solar de 3 HP y 5 HP de capacidad se utilizan para fines de riego en la India. Además, la huella de carbono de los sistemas de bombeo solar de 1 HP es mucho menor que las bombas eléctricas conectadas a red y las bombas operadas con diésel. Así, los sistemas de bombeo solar de 1 HP podrían ser una solución viable para agricultores pequeños y marginales en el contexto de la situación de escasez de agua en un futuro y a fin de mermar las secuelas del cambio climático en las granjas agrícolas. (Santra, 2020)

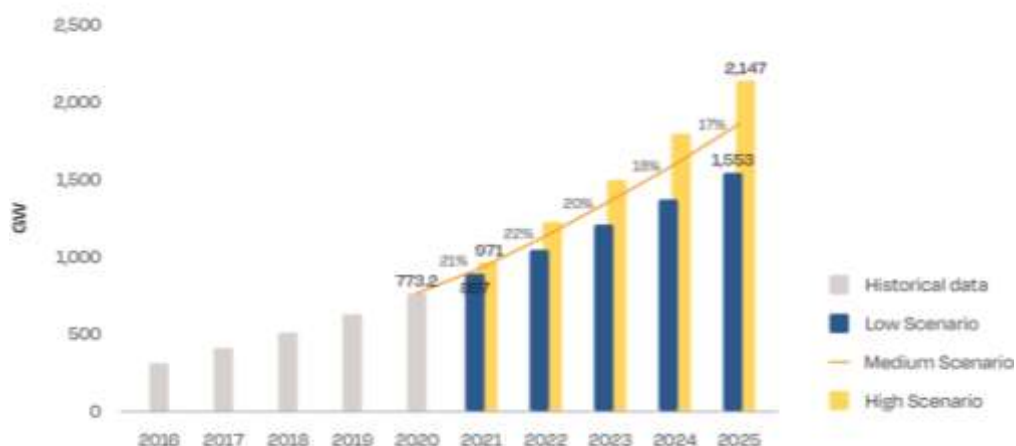


Figura 1. *Proyección mundial de producción de energía fotovoltaica*

Fuente: Portal web El Periódico de la Energía (2021)

Específicamente en América Latina tenemos algunos casos concretos que pueden bosquejar mejor la realidad en la que está la energía fotovoltaica de nuestro lado del mundo.

A escala global, están ya en marcha proyectos que solarizan diversas clases de riegos a presión. Son 4 países europeos en los que existe el denominado proyecto Maslowaten, el cual desarrolla 5 demostradores para 5 clases diversas de irrigación y tiene una generación neta de potencia de 820 kWp. Del lado de nuestro continente, en el país argentino, específicamente Buenos Aires, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA presentó un proyecto en el que se emplea energía solar en el abastecimiento de electricidad a sistemas de irrigación gota a gota aplicados a cultivos de cebolla, lográndose obtener un 90% de eficiencia en utilización del agua, superando notoriamente el 50% de eficiencia correspondiente al riego por melgas, mostrando esto una optimización en el uso del recurso energético. En Mendoza, últimamente se ha implementado un programa de irrigación solar fotovoltaico para el riego por goteo de viñedos en el Valle de Uco, departamento de San Carlos. (Schilardi et al., 2020)

En Colombia, según Arroyave (2018) para electrificar zonas no interconectadas (ZNI) se tienen grupos electrógenos a diésel, módulos solares y almacenamiento con baterías, además en Colombia se promueve por ley la generación distribuida y la autogeneración para satisfacer la demanda propia, esto muestra que Colombia, en cuanto a legislación, avanza en la promoción de las energías renovables no convencionales.

En Chile, de acuerdo con la Fundación para la Innovación Agrícola (2020), la agricultura familiar campesina y los pequeños agricultores en general constituyen un sector importante en la economía de un país, tanto en la seguridad alimentaria como en la generación de empleo agrícola. No obstante, para mantener y explotar sus unidades productivas, incluso para autoconsumo, enfrentan altos costos energéticos para obtener agua, insumo necesario tanto para sus cultivos y ganado como para su propio consumo. Para abastecerse de ella, muchas veces utilizan bombas convencionales, que

los obligan a incurrir en gastos recurrentes para solventar el combustible que requieren para operar un generador externo o, cuando existe red eléctrica, el consumo de electricidad, además de la inversión asociada a la extensión de una línea de energización desde la fuente hasta el pozo. Por otra parte, aquellos agricultores que tienen pozos profundos, donde el espejo de agua está a más de 4 o 5 metros de profundidad, requieren comprar una bomba sumergible, que es de mayor costo que una de superficie y más compleja de mantener. Así, y con el fin de proporcionar una opción eficaz y de menor costo para el bombeo de agua que sea accesible a la agricultura familiar campesina, se plantea como alternativa un proyecto de sistema de bombeo solar que permite aumentar la eficiencia de una bomba de superficie de baja potencia para elevar agua.

Nacional

Referente a nuestro país, durante décadas, la generación de energía eléctrica ha tenido dos grandes fuentes: la hidráulica convencional y la térmica mediante diésel. En el año 2004 el gas de Camisea empleado para generación eléctrica propició un cambio en el sector energético del Perú, logrando que el 94.85% de la población tenga acceso al suministro de energía eléctrica en sus hogares. A su vez, en el año 2008 el Estado peruano promulga el Decreto Legislativo N° 1002 y marca un nuevo hito hacia la pluralización de la matriz energética por medio de la presencia de fuentes energéticas renovables no convencionales como la energía solar fotovoltaica. (Pérez, 2019)

Al contrario de los países nórdicos, el territorio nacional, al encontrarse muy cercano al Ecuador, posee un mayor número de horas de sol al año. De acuerdo con el Atlas Solar del Perú desarrollado por el Ministerio de Energía y Minas, nuestro país posee altos niveles de irradiación solar anual con valores que en la sierra se estiman entre 5.5 a 6.5 kWh/m²; 5.0 a 6.0 kWh/m² en la Costa y en la Selva se estima de 4.5 a 5.0 kWh/m². En nuestro país existen tres sectores en los cuales se viene empleando tecnología referida a energía solar. El primer sector (y el más tradicional) es el empleo de la irradiación como fuente calórica captada mediante termas de agua en

localidades del sur peruano, especialmente Arequipa y Puno. Asimismo, el uso de las termas solares no se restringe solo al ámbito doméstico, sino que puede aplicarse también en sectores productivos como secadores de grano para la agricultura o para la potabilización de agua en localidades donde se requiera este uso. El otro sector en el que existe progreso es en el de suministro de energía eléctrica a las zonas o localidades rurales y finalmente el tercer sector, y el de mayor proyección, es el de la producción de energía eléctrica mediante 4 parques solares que conectarán al SEIN. (PUCP, 2017).

La agricultura es una de las labores capitales entre las localidades remotas de Arequipa, un caso de ello es la provincia de Castilla, en la cual el riego es un factor primordial en el desarrollo de la producción agrícola, pero este factor requiere de una optimización que permita la obtención de una mayor relación costo beneficio y por ende se mejore el rendimiento del proceso siembra-cosecha. Para lograr esto en una zona remota se emplean las motobombas a diésel para poder regar los cultivos; sin embargo, estas máquinas necesitan de un periódico mantenimiento y generan contaminación medioambiental, es así que una alternativa adecuada al empleo de motobombas accionadas por combustibles es el uso de sistemas de bombeo solar fotovoltaico manteniendo el riego para los cultivos, así como para el ganado. (Peralta, 2018).

Los sistemas de bombeo de agua mediante generadores fotovoltaicos representan actualmente una gran alternativa de solución para zonas rurales y aisladas en nuestro territorio. Las primeras instalaciones en el territorio nacional datan del año 1978 donde los motores empleados eran de corriente directa en media y baja potencia (inferiores a 800 W) e iban acoplados directamente al generados fotovoltaico. Posteriormente se incorporaron a estos sistemas de bombeo solar los motores de corriente alterna y ello significó un progreso en materia de electrónica, incrementando la confiabilidad y los valores de potencia generada. Sin embargo, a pesar de las notables mejorías en cuanto a convertidores CA/CD e inversores CD/CA aún se sigue investigando sobre nuevas mejoras en los sistemas de bombeo solar. Al día

de hoy, la tasa de consumo humano de agua para zonas rurales se estima en 20 litros por día, pero en estas localidades la demanda mayoritaria de agua es demandado por los sistemas de cultivo agrícola y las actividades ganaderas (Alata, 2015).

En nuestra Sierra peruana existen parcelas agrícolas en las cuales se tienen cultivos por secano como por ejemplo maíz, papa, haba y trigo, estos poseen periodos vegetativos menores a un año; pero a pesar de esta ventaja, solo se da la siembra en temporadas de avenida (octubre – abril) ya que, en temporadas de estiaje (abril – setiembre) no se presenta suficiente flujo volumétrico para la irrigación demandada por estos sembríos, Es aquí donde existe una potencial solución mediante energía solar debido a que, en las épocas de estiaje existe una alta irradiación y ello puede emplearse para generar potencia para una bomba que extraiga agua del subsuelo y así se pueda concretar una segunda siembra por año. De otro lado, en lugares aislados de las zonas alto andinas al sur de nuestro país existe escaso acceso a la electricidad, así como inadecuados sistemas de bombeo de agua, es así que en estos lugares la energía fotovoltaica significa una alternativa rentable porque es renovable, ilimitada, sin ningún tipo de emisiones y con costos que van decreciendo considerablemente facilitando cada vez más el uso de los módulos solares (Asmat, 2018).

Regional

El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) manifestó sobre la etapa II del Programa Masivo Fotovoltaico lanzado a nivel nacional con el fin de suplir de electricidad a las localidades del tipo rural de los lugares remotos de nuestro territorio, que empezará el año del bicentenario beneficiando a cerca de 48 mil domicilios del norte del Perú. Los departamentos beneficiarios de esta segunda etapa son Cajamarca (12430 módulos solares), Loreto (10720), Áncash (6232), Piura (5855), Amazonas (5393), La Libertad (4848), San Martín (1600), Lambayeque (682) y Tumbes (195) (El Peruano, 2021).

Para una empresa agrícola ubicada en el kilómetro 733 de la panamericana norte con carretera de entrada a la agrícola Cerro Prieto, del

distrito de Pacanguilla, Chepén, La Libertad, se identificaron problemas como el exceso en la demanda de energía eléctrica, interrupciones del servicio de electricidad en unas 4 veces por mes generando esto que los procesos de operación se detengan de entre 4 a 3 horas significando ello pérdidas monetarias, de otro lado en las casetas donde se ubica el sistema de bombeo para irrigación no existe iluminación lo que dificulta las labores nocturnas por la escasa visibilidad. Por todo lo expuesto se presenta como alternativa de solución la energía solar fotovoltaica para bombeo, considerando que en el distrito de Chepén se tiene un rango de irradiancia de 4.74 kWh/m²-día – 6.26 kWh/m²-día, siendo estos, valores adecuados para una posible instalación (Talavera, 2019).

En el distrito de Guadalupito, La Libertad, según la Administración local del agua Moche Chao Virú (2010) existe aproximadamente 100 ha de cultivo a los cuales no llega la red de canales del lugar, razón por la cual los cultivos no se riegan por gravedad si no que emplean riego tecnificado por goteo y para ello emplean motobombas accionadas por combustible, existen motobombas de 5, 7 HP incluso hasta de 20 HP entre los cerca de 20 agricultores, quienes reportan excesivos gastos en la compra de combustible y se busca otra alternativa como la energía solar fotovoltaica.

1.2. Antecedentes de estudio

Internacionales

Santra (2020) en su trabajo de investigación “Evaluación del rendimiento del sistema de bombeo solar fotovoltaico para proporcionar riego a través de técnicas de micro irrigación utilizando recursos de agua superficial en la región cálida y árida de la India” Manifiesta que las bombas de gran capacidad también se utilizan a menudo para elevar los recursos de agua subterránea en la India, lo que puede conducir a un mayor agotamiento de la capa freática. Teniendo en cuenta estas limitaciones, el objetivo de la investigación fue de evaluar el rendimiento de las bombas solares fotovoltaicas de tamaño pequeño de 1 HP de capacidad para elevar e irrigar los recursos de agua poco profunda utilizando sistemas de riego presurizados. Las observaciones revelaron que un sistema de bombeo solar de 1 HP, ya sea CA o CC, podría usarse con éxito para operar mini aspersores, microaspersores y goteros con buena uniformidad de riego. Además, se diseñó un módulo autosostenible para el uso sostenible del agua y la energía en el que tanto el agua como la energía se recolectan y reciclan. La evaluación del costo del ciclo de vida mostró que el sistema de bombeo fotovoltaico solar de 1 HP (CC) era ligeramente más barato que el sistema de bombeo de CA correspondiente. Incluso, las emisiones de CO₂ de los sistemas de bombeo solar de 1 HP es bastante menor (0,009 kg CO₂-eq ha/mm⁻¹) que las bombas eléctricas conectadas a red (1,214 kg CO₂-eq ha-mm⁻¹) y las bombas a diésel (0,382 kg CO₂-eq ha-mm⁻¹). Para finalizar, el autor llegó a la conclusión de que los sistemas de bombeo solar de 1 HP podrían ser una solución viable para los agricultores pequeños y marginales en el contexto de la situación de escasez de agua en un futuro próximo y para atenuar las consecuencias del cambio climático en las granjas agrícolas.

Schilardi (2019) en su estudio titulado “Diseño de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para riego por goteo en viñedos” expresa como objetivo principal realizar el diseño de un sistema de bombeo solar con el fin de generar electricidad para una agrupación de bombeo de un conjunto de irrigación gota

a gota de 18.83 ha de viñedos. En el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico se usó el método intuitivo. Se estimó la demanda neta y bruta requerida por 01 ha de vid por año, obteniendo valores de 776 mm/ha y 862 mm/ha para el lugar de estudio. Para abastecer de este requerimiento para la totalidad de hectáreas, el sistema de riego debe operar 1230 h por año. Con respecto a la data de irradiación solar, algunas fuentes de información expresaban sobreestimaciones y otras subestimaciones en comparación a la data medida por la estación meteorológica local. La inclinación óptima de los paneles se calculó en 26.47°. El mes más crítico fue agosto y en base a este se realiza el diseño de todo el sistema. Los resultados finales expresan que se requiere de una instauración de 120 módulos solares (12 serie x 10 strings) con una separación no menor a 2.47 m y esta cantidad cubre un área de 390 m². Para finalizar, se dio la unificación del método de diseño intuitivo planteado en una hoja Excel programada usando Visual Basic para posteriores aplicaciones y así automatizar el dimensionamiento de este tipo de sistemas.

Tsuchiya et al. (2020) en su estudio científico denominado: “Análisis del tiempo de recuperación de la energía y retorno de la inversión de sistemas fotovoltaicos fuera de la red en áreas rurales de Tanzania” tuvieron como finalidad investigar dos casos de sistemas de generación de electricidad fotovoltaica en las zonas rurales de Tanzania mediante una evaluación del ciclo de vida. El periodo de restablecimiento de la energía (EPBT) calculado a partir de la utilización de los sistemas fotovoltaicos, teniendo en cuenta los datos del inventario de la Agencia Internacional de Energía, reveló un desempeño insatisfactorio. Específicamente, los EPBT basados en la generación de energía real en los sitios excedieron en gran medida los cálculos de radiación solar basados en el valor esperado. En un sitio, el EPBT incluso superó la vida útil del panel fotovoltaico, lo que indica que la recuperación de energía era imposible. Con respecto al retorno de la inversión en energía (EROI), se evidenció que los ingresos generados por las inversiones fueron insuficientes para cubrir los costos operativos actuales, lo que sugiere retornos negativos de la inversión. Por el contrario, la generación

de energía diésel pareció ser más adecuada en estas áreas debido a la baja y discontinua demanda de energía. El autor concluyó que, aunque solo se examinaron dos casos en este estudio, ofrecen una idea de la situación actual, es decir, los sistemas fotovoltaicos de Tanzania no se están utilizando satisfactoriamente. Además, con base en el simple análisis del retorno de la inversión, el retorno del capital invertido para tales proyectos ha sido negativo.

Benghanem et al. (2018) realizó el trabajo de investigación titulado “Estimación del caudal diario de sistemas de bombeo de agua fotovoltaicos utilizando datos de radiación solar” el cual tuvo como objetivo realizar un modelo sencillo que permitiera aportar en materia de investigación sobre dimensionamiento de sistemas de bombeo de agua fotovoltaicos. El estudio obtuvo una relación no lineal entre el flujo volumétrico hídrico y la energía solar y se determinó experimentalmente en un primer paso y luego se utilizó para la predicción del rendimiento. El modelo propuesto permite simular el caudal de agua utilizando datos de radiación solar para diferentes alturas (50 m, 60 m, 70 m y 80 m) y para una configuración de campo fotovoltaico 8S x 3P. Los datos experimentales se obtuvieron con la instalación de prueba de bombeo de los investigadores ubicada en el sitio de Madinah (Arabia Saudita). Luego, los rendimientos se calcularon utilizando los datos de radiación solar medidos de diferentes lugares en Arabia Saudita. Conociendo los datos de radiación solar, se estimó con buena precisión el caudal de agua Q en cinco ubicaciones (Al-Jouf, Solar Village, AL-Ahsa, Madinah y Gizan) en Arabia Saudita. Finalmente, el autor concluye que el caudal Q aumenta con el incremento de la potencia de la bomba para diferentes cabezales siguiendo el modelo no lineal propuesto.

González y Lanuza (2018) en su proyecto de investigación “Propuesta de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para riego por goteo en la finca Concepción comarca Ato viejo San Nicolás – Estelí, durante el periodo de julio a noviembre del 2017”, tuvieron como objetivo principal la elaboración de la formulación de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para irrigación gota a gota para así mejorar la producción agrícola en la finca mencionada en el título

del trabajo. Para cumplir con el objetivo trazado, se estimó primero el caudal demandado por la manzana de cultivo de tomate, posterior a esto se dimensionó el sistema solar fotovoltaico y se seleccionó la bomba adecuada a través de ecuaciones y curvas características para finalmente realizar el análisis financiero del sistema propuesto y así determinar si su implementación es viable o no. Se obtuvo como resultados que el número de módulos solares que se necesitan para esta aplicación es de 12 de 200 Wp cada uno, inversor SAM CD/CA 2 kW 120/240 V para accionar una bomba de tipo lapicero de 2 HP CA. El análisis financiero mediante cálculos de VAN y TIR, determinó que es rentable realizar la implementación del sistema, pudiéndose obtener un financiamiento de 6513.82 U\$, al 9% de interés y teniendo utilidades de 2.09 U\$ por dólar invertido una vez transcurrido cinco años de la inversión inicial.

Llopis (2018) en su trabajo final de master titulado “Diseño de una instalación solar fotovoltaica para bombeo de 55 kW para el riego de la huerta de Alicante de Mutxamel” tuvo como objetivo calcular la energía eléctrica demandada por la estación de bombeo para luego calcular todo el parque solar partiendo de la demanda eléctrica proyectada. En el presente estudio se inicia recogiendo las necesidades hídricas de la instalación y las condiciones meteorológicas del lugar se calcularon características, cantidad y arreglo de los módulos fotovoltaicos. Se determinaron 629 módulos de 315 Wp con lo que se tiene una potencia instalada de 214 kWp CD, luego, para la conversión CD/CA según los kilowatts pico y los cálculos de acoplamiento entre el generador solar y el inversor, se opta por un inversor de 200 kW, acorde también a lo recomendado por el software PVsyst. El sistema final es capaz de generar 294.0 MWh/año. Finalmente, el investigador concluye de que, ajustar la demanda de la estación de bombeo con la generación solar fotovoltaica, es la parte primordial del proyecto debido a que determinará las características de las placas solares que se seleccionarán y el número de módulos solares que se implementarían.

Nacional

Banda, A. (2017), en su investigación denominada: “Estudio de viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico autónomo en las instalaciones de la UCSP” (Arequipa), tuvo como objetivo realizar el estudio de viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico aislado en los establecimientos de la UCSP. A fin de cumplir con ello determinó que el mes crítico para el diseño es junio con 5.45 HSP. La demanda diaria se estimó en 22.6 kWh y para suministrar esta cantidad de energía se necesitan 28 módulos de 255 Wp, 02 inversores de 1.2 kW, 02 controladores de carga de 100 A y un banco de 24 acumuladores de 200 Ah/12 V con los que el sistema tendría una autonomía de 1.2 días suministrando energía en un voltaje de 48 V. La inversión inicial asciende a USD 26 344.80 para instalar todo el parque solar. Suponiendo un consumo uniforme por año, el costo unitario USD/kWh es de 0.262; sin embargo, considerando la potencia instalada del sistema solar se obtiene un costo de 0.198 USD/kWh. El autor concluye la implementación de un sistema fotovoltaico aislada de la red es viable técnicamente, pero no económicamente a pesar de que la intensidad y de irradiación solar en la locación es favorable.

Asmat (2018) realizó el trabajo de tesis “Determinación de la eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico en el distrito de Yaurisque – Cusco” en el cual el objetivo fue evaluar la eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico y hallar la capacidad diaria de agua que puede bombear el sistema condicionado a la climatología del distrito mencionado. El tiempo durante el cual se dieron los ensayos para este estudio fue desde el 30 de agosto al 6 de setiembre, siendo la cantidad diaria media de agua bombeada en campo de 4.17 m³. Se determinó la eficiencia de la bomba solar en 26.12 % y del módulo solar en 95.54% para finalmente del producto de estos valores calcular la eficiencia global de la instalación en 24.95%. Para la realización del análisis estadístico se considera como variables independientes la irradiación, temperatura y velocidad del viento, luego las variables dependientes son el flujo de agua que es capaz de abastecer la bomba y la corriente generada por

el módulo, variables que presentan alto grado de dependencia de la irradiación. Por último, se concluye que el sistema de bombeo fotovoltaico no opera en su punto de máxima eficiencia, porque la bomba opera a una muy baja respecto de la ideal. Bajo estas condiciones se determinó en 0.34 Ha la superficie máxima que es posible regar para los cultivos de maíz amiláceo, trigo y hortalizas, según requerimientos hídricos de estos cultivos, los cuales son propicios para la climatología y altura de la zona.

Farfán y Campos (2019) en su estudio denominado “Energía solar fotovoltaica para la explotación de agua subterránea” tuvieron como objetivo presentar a la tecnología de bombeo solar empleada para explotación de aguas subterráneas como mejor alternativa a la ya conocida forma de bombear agua por medio de grupos electrógenos o energía eléctrica de la red, para fines agrícolas en la Cuenca Motupe – Olmos – La Leche. De acuerdo al Mapa de Irradiación Solar del Perú, desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en conjunto con el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el lugar objeto de estudio posee elevados niveles de irradiación solar diaria con valores que fluctúan entre 5.4 y 6.1 kWh/m². De otro lado, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) manifiesta que existen cerca de 4350 pozos de aguas de subsuelo en la zona donde se desarrolla la investigación, la cual incluye las localidades de Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope, Pítipo y Salas, en las cuales el agua mayormente se extrae empleando un generador eléctrico. La investigación ofrece datos de las cualidades técnicas, aforos y explotación de los pozos. Luego, considerando las condiciones de irradiación solar local, el requerimiento de recurso hídrico diario, se determinan las características técnicas de diseño de un sistema que sea capaz de realizar la extracción de las aguas del subsuelo para fines de irrigación empleando tecnología fotovoltaica.

Peralta (2018) en el estudio de investigación “Estudio experimental de un sistema de bombeo solar fotovoltaico en corriente continua” expone como finalidad de la investigación llevar a cabo un estudio empírico para la generación de energía eléctrica empleando un sistema solar fotovoltaico en

corriente directa, para bombeo de agua, disminuyendo así la emisión de gases dañinos para el ambiente, los cuales son producidos por máquinas que requieren de combustibles fósiles para su funcionamiento. En esta investigación se emplearon diversos equipos de medición para obtener datos meteorológicos de irradiación solar incidente en la localidad de estudio y para el cálculo de la eficiencia del sistema solar de bombeo. En este proyecto la aplicación de la energía fotovoltaica se dará en corriente directa sin inversor en virtud a que este tipo de aplicaciones está en creciente difusión y su progreso se acelera cada día más para diversos casos de interés. Esta modalidad de uso de la energía solar requiere de componentes básicos y escaso mantenimiento. Los resultados del trabajo señalan que los sistemas de energía solar fotovoltaica en corriente directa presentan mayor eficiencia que los de corriente alterna ya que los primeros no requieren del uso de un inversor CD/CA y el uso de la energía producida por el generador es directo. Además, se encontró que los sistemas solares en CD poseen una mayor eficiencia en la generación de campo magnético debido a la producción de un pulso que imita una onda sinusoidal.

Cajusol (2019) en su tesis titulada “Dimensionamiento de un sistema híbrido eólico solar para el bombeo de agua en el fundo san juan de Cayaltí provincia de Chiclayo - Lambayeque” presenta como objetivo el dimensionamiento de un sistema híbrido eólico solar para bombear agua en el fundo mencionado líneas arriba; esto como propuesta de solución a la problemática económico – ambiental que se origina del uso de una motobomba tradicional para el riego. Para esto primero se determinó el mes en el que se requiere mayor suministro de agua, esto fue, febrero, en el que la demanda asciende a 248,51 m³/día y el mes de menor demanda de recurso hídrico fue junio con 123,77 m³/día. La data de irradiación solar fue suministrada por la plataforma Power Data Access Viewer de la NASA donde tomando el valor más desfavorable se tiene 4,89 kWh/m²/día. Se obtuvieron además datos horarios de velocidad de viento para el mes junio que es el mes con velocidad de viento mínima y para el mes de noviembre que es el mes

con velocidad máxima. Posteriormente se calculó que en el mes con de mínima velocidad, el aporte de energía eólica representa el 9.20 % y en el mes con máxima velocidad este aporte incrementa a 38.6 % de la energía total que se demanda. El sistema finalmente queda conformado por 01 aerogenerador de 2000 W, 14 módulos fotovoltaicos, 08 acumuladores de capacidad 503 Ah, 01 controlador de carga 150/85 y además de un inversor de 5000 W. El desembolso monetario del sistema de bombeo híbrido eólico solar asciende a S/. 91 201,05.

Zambrano (2019) en su tesis “Sistema de bombeo de agua utilizando paneles solares en el sector Boyero – C.P. Porcón Alto” presenta como finalidad el determinar la factibilidad de la instalación de un sistema de bombeo de agua empleando módulos solares en el sector Boyero. Los datos de horas solar pico fueron tomados del SENAMHI para determinar si el sistema es energéticamente factible, luego para la factibilidad hidráulica se aforó el pozo tubular 20 veces en el periodo de mayo a junio del 2019, empleando el método de suspensión de un hilo lastrado, para el diseño hidráulico de la red de conducción y para la red de distribución se aplicó la NTP de saneamiento rural. Luego de evaluar la data de horas solar pico en el periodo de mayo – octubre (época de estiaje) de un total de 6 años se obtuvo una media de 6.22 HSP al día. Respecto de la medición del gasto, se obtuvo un flujo de 1.232 l/s y a la vez, se definió una demanda de recurso hídrico de 0.101 l/s, requerimiento que se abastece con una bomba de 0.75 kW, para lo cual, el número de módulos fotovoltaicos requeridos es de 04. Finalmente, el autor concluye que, el sistema de bombeo de agua es factible en materia energética e hidráulica, ya que se tiene suficiente potencial solar para satisfacer la demanda de la población del sector en el que se desarrolla la propuesta aquí expuesta.

Regionales

Chávez (2018) en su proyecto de tesis titulado “Modelamiento, simulación y control comparativo de un panel solar con autoposicionamiento para la empresa Ayni SAC – Trujillo” tuvo como objetivo general modelar,

simular y optimizar el fenómeno de captación – transformación y sistema de control de un panel solar con autoposicionamiento para conseguir el máxima rendimiento factible, para ello primero se determinaron las necesidades de la empresa, luego se definieron las especificaciones del módulo solar elegido utilizando cálculos de métodos numéricos. Posterior a esto se constituyó el modelo matemático del fenómeno de captación – transformación de energía y 3 posibles controles del seguidor solar. Con ello se fijó la configuración óptima en función al parámetro rendimiento energético hallado. Con datos del panel solar se logró obtener sus resistencias internas siendo la resistencia serie $R_s = 0.26 \Omega$ y la resistencia paralela $R_p = 227.62 \Omega$, determinando además las curvas características del panel. Una vez determinado el objeto de estudio, se procedió a simular diversos arreglos en Simulink, modificando los sistemas de control que se mencionan a continuación: Variación Lineal de Tensión, PID y Lógica Difusa. Siendo el arreglo con mayor rendimiento, el de Lógica Difusa. Por último, se realizó el análisis económico del sistema fotovoltaico, siendo el desembolso igual a S/.3 672.50

Heredia y Sánchez (2017) realizó la tesis denominada “Diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico por goteo automatizado para terrenos de cultivo de espárragos del fundo Inca verde en el sector Pampas La Sandia provincia de Chepén - departamento de La Libertad”. El proyecto de investigación presentó el diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico gota a gota automatizado para la producción de cultivos de espárragos. Para ello se usó la evapotranspiración potencial de los cultivos dados por el Instituto Nacional de Innovación Agraria. Para hallar la demanda de recurso hídrico se consideraron la temporada de siembra y periodo de crecimiento de los cultivos, hallándose un gasto de $45 \text{ m}^3/\text{hora}/2 \text{ ha}$. El cálculo de las pérdidas por fricción en la tubería se determinó mediante la relación de Hazen – Williams con la que se encontró la altura manométrica requerida. Se dimensionó el generador fotovoltaico considerando que son necesarios 14.92 kW para poner en marcha las dos bombas instaladas además de otros equipos implementados. Se realizó a su vez el diseño de sistema de riego

gota a gota automatizado a fin de optimizar la demanda de recurso hídrico en la siembra de espárrago del fundo Inca Verde, diseñándose para tal fin un sistema de mando que controlará el lapso de irrigación que se requiere por unidad de hectárea de espárrago.

Talavera (2019) realizó el trabajo de investigación titulado “Factibilidad Técnico Económico Mediante la Implementación De Paneles Solares Fotovoltaicos Para Accionar Las Bombas De Riego Agrícola En El Distrito De Pacanguilla – Chepén – La Libertad”. El estudio plantea como objetivo principal presentar una alternativa técnica y económica que permita dotar de potencia las bombas de irrigación en una empresa agrícola de la localidad mediante el establecimiento de un generador fotovoltaico. El trabajo tuvo una población de 6 casetas de sistema de riego, cada una de ellas conformada por 9 bombas; sin embargo, en el desarrollo de la investigación se tomó como muestra 1 caseta del sistema de bombas para irrigación, la cual consta de 9 bombas. Con ayuda del software PVsyst se determinó que el valor más crítico en el lugar objeto de aplicación del proyecto es 47.74 kWh/m^2 , además se halló el costo de consumo eléctrico a través de cálculos y luego el sistema fotovoltaico finalmente quedó conformado por: generador fotovoltaico, controlador, acumulador e inversor. Los elementos constituyentes se rigen a la normatividad de calidad y seguridad según ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001 viables para la aplicación. El desembolso se estimó en S/. S/.1 009,149.72 con utilidades anuales de S/.274 694,46.

1.3. Marco teórico

1.3.1. Energía solar

De acuerdo con OSINERGMIN (2019) la energía solar es una forma de energía renovable al igual que la mini hidráulica o la eólica. Esta energía proviene de las radiaciones electromagnéticas radiadas por el sol siendo capaz de provocar reacciones químicas o generar electricidad mediante el efecto fotovoltaico a través de paneles solares. La energía solar representa el origen de otras formas de energía como la eólica, ya que el sol al generar diferencia de temperaturas en la tierra produce los fuertes vientos; la biomasa, que se forma mediante la intervención de la luz solar en el proceso de fotosíntesis o la mini hidráulica, cuya existencia se debe al ciclo hidrológico, el cual es impulsado por la energía proveniente del sol.

La mayor ventaja de la energía solar es que es renovable y limpia. Los equipos de tecnología solar para su funcionamiento no requieren de combustibles, no generan gases nocivos para el ambiente o algún tipo de material tóxico, es por ello que el uso a escala mundial de esta forma de energía tiene el potencial de menguar drásticamente el impacto ambiental. La energía solar complementa otras fuentes de energía renovables, como la eólica o la hidroeléctrica. Hay muchas formas de aprovechamiento; se puede generar electricidad mediante paneles ya sea a gran escala o nivel doméstico, existen también las cocinas solares, termas solares, etc. (Turgeon y Morse, 2021)

La principal desventaja en el uso de energía solar es la inversión inicial: es costosa. Aunque algunos países comúnmente ofrecen menores impuestos a personas y empresas que utilizan energía solar, y la tecnología puede eliminar los recibos por el servicio eléctrico, la inversión inicial es muy elevada. Los equipos de energía solar son pesados y requieren techos fuertes y grandes para soportarlos. La tecnología depende de factores aleatorios, como el clima y la nubosidad y en muchos lugares del planeta, la variación de luz solar complica su implementación como única fuente de energía. (Turgeon y Morse, 2021).

Actualmente la energía solar es ampliamente utilizada y su desarrollo tecnológico ofrece cada día precios más competitivos y se espera que en los próximos años pueda cubrir grandes cantidades de energía a nivel mundial.

1.3.2. Tecnologías de aprovechamiento solar

OSINERGMIN (2019) afirma que la tecnología de aprovechamiento de energía solar se puede catalogar en: pasivos y activos. La tecnología pasiva no requiere de mecanismos para captar la energía solar. Pasa lo contrario con los sistemas activos, los cuales sí necesitan dispositivos para la captación de la irradiación solar, como los paneles solares o los colectores solares.

Los paneles fotovoltaicos transforman la irradiación proveniente del sol en electricidad empleando para ello materiales semiconductores como el silicio, elemento que es el más empleado en la fabricación de células solares.

La energía solar térmica consta del aprovechamiento de la energía solar, convirtiéndola en calor por medio de un colector. Los parques solares térmicos, son un conjunto de tecnologías que, luego de recibir la radiación, calientan un fluido y empleando un ciclo Rankine pueden producir el vapor necesario para poner en marcha un turbo-generador, y de esta manera producir potencia eléctrica. Existen 4 clases de centrales solares térmicas.

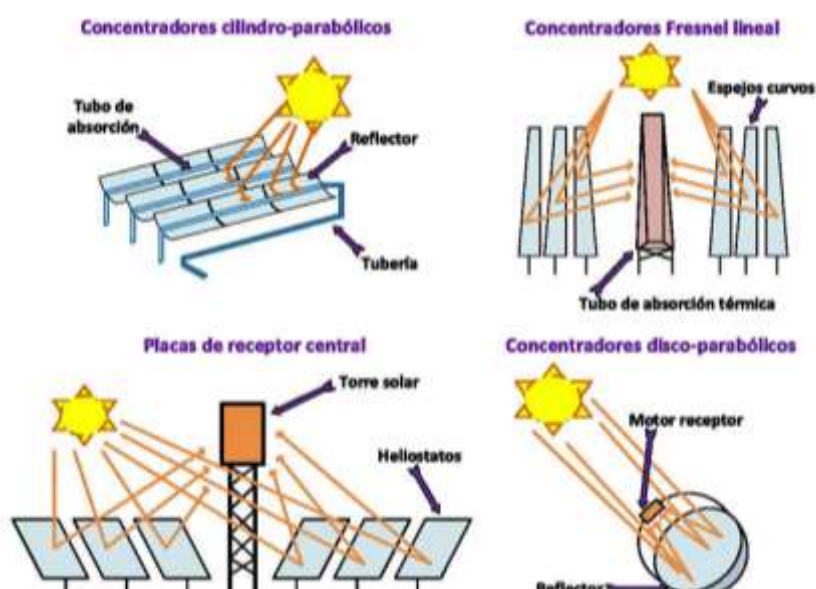


Figura 2. Tipos de centrales solares térmicas

Fuente: Endesa Fundación (2018)

1.3.3. Fundamentos de energía solar

1.3.3.1. Movimiento solar

Los movimientos de rotación y traslación terrestre son vistos como movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste respecto de la superficie de la Tierra (Perpiñan, 2020). Para entender este aparente movimiento solar se suele emplear un sistema de coordenadas polar, con dos ángulos, los cuales ayudan a obtener la posición relativa solar (Manzana, 2017, como se citó en Espinoza y Zaroni, 2021).

Se tienen los ángulos a continuación:

Altura solar (α): este parámetro es el ángulo formado por los rayos solares con la superficie horizontal. Es igual a cero a la hora de salida y la del ocaso y alcanza el mayor valor al mediodía solar (Bautista, 2013).

Azimut solar (ψ): ángulo formado por la dirección sur con la proyección horizontal de los rayos solares, hacia el norte

Por el noreste o por el noroeste, tomando la orientación sur como $\psi = 0^\circ$, y los ángulos entre el sur y el noreste negativos y entre el sur y el noroeste positivos (Alonso, 2015).

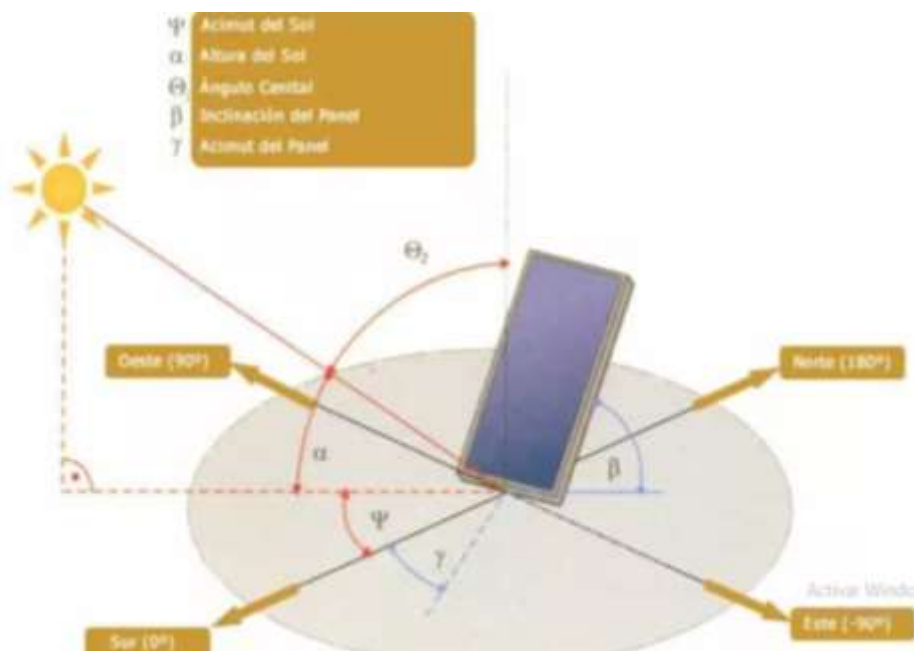


Figura 3. *Ángulos en el movimiento solar relativo*

Fuente: SUNFIELD EUROPE (2015)

1.3.3.2. Radiación solar

Es la gama de radiaciones electromagnéticas irradiadas por el Sol. El Sol es una estrella de nuestro sistema solar que posee una temperatura promedio de aproximadamente 5800 K, y en cuyo interior se dan una serie de reacciones termonucleares de fusión que generan una transformación continua de masa solar en energía solar. Esta energía liberada por el sol se transmite al espacio exterior a través de la radiación solar y es la que incide sobre nuestro planeta. (Abad y Flores, 2017).

A su vez, Messenger y Abtahi (2017) afirman que el Sol está compuesto por una mezcla de gases con predominio de hidrógeno. A medida que el Sol transforma el hidrógeno en helio en una reacción de fusión termonuclear masiva, la masa se convierte en energía según la popular fórmula $E = mc^2$. Como consecuencia de esta reacción, la superficie del Sol se mantiene a una temperatura de aproximadamente 5800 K. Esta energía se irradia desde el Sol de manera uniforme en todas las direcciones, en estrecha concordancia con la fórmula de radiación del cuerpo negro de Planck. La densidad de energía en la superficie del Sol tiene elevados valores y para cuando esta energía ha viajado 150 millones de km a la Tierra, la densidad de energía extraterrestre total disminuye a **1367 W / m²** y a menudo se la denomina **constante solar**.

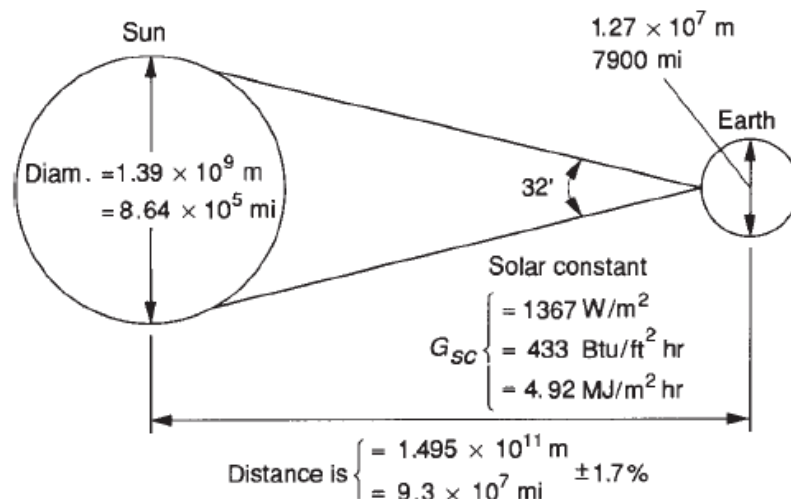


Figura 4. Sistema Tierra – Sol y constante solar

Fuente: Abad y Flores (2017)

1.3.3.3. Componentes de la radiación solar

A medida que la radiación ingresa a la atmósfera terrestre, en su camino hacia la superficie terrestre pasa por una serie de procesos de reflexión, atenuación y difusión que modifican sus propiedades extraterrestres. La reflexión por acción de las nubes reduce la radiación incidente en la superficie terrestre mientras que la absorción por vapor de agua, ozono y CO_2 genera cambios en las propiedades espectrales de la radiación. (Perpiñán, 2020)

Messenger y Abtahi (2017) exponen las acciones que llevan a cabo las moléculas sobre la radiación solar a su paso por la atmósfera. El agua en estado de vapor, el dióxido de carbono y el ozono, por ejemplo, se encargan de absorber grandes cantidades de radiación solar en ciertas longitudes de onda. El ozono principalmente absorbe gran cantidad de radiación en la zona ultravioleta del espectro, mientras que el vapor de agua y el dióxido de carbono absorben principalmente en las partes visible e infrarroja del espectro.

De acuerdo con Perpiñán (2020), los componentes de radiación solar son:

Radiación directa: Es la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra en línea recta sin dispersarse.

Radiación difusa: comprende toda radiación dispersada por la atmósfera terrestre según los procesos ya estudiados. Este tipo de radiación depende de la zona de origen de los rayos solares.

Radiación de albedo: La luz solar que se refleja desde el suelo se llama radiación de albedo. Por lo general representa una componente despreciable y en ciertos casos puede considerarse nula.

La adición de los tres componentes de la radiación solar se llama **radiación global**.

La cantidad de radiación dispersada depende de la longitud recorrida a través de la atmósfera. Esta longitud generalmente es comparada con una trayectoria vertical directamente al nivel del mar, que se designa como masa de aire = 1 (AM 1). Por lo tanto, la masa de aire a mayor altitud será menor que la unidad cuando el Sol esté directamente arriba y la masa de aire generalmente será mayor que la unidad cuando el Sol no esté directamente arriba. En AM 1, una vez que se ha tenido en cuenta la absorción, la intensidad de la radiación global generalmente se reduce de 1367 W/m^2 en la parte superior de la atmósfera a poco más de 1000 W/m^2 al nivel del mar. (Messenger y Abtahi, 2017)

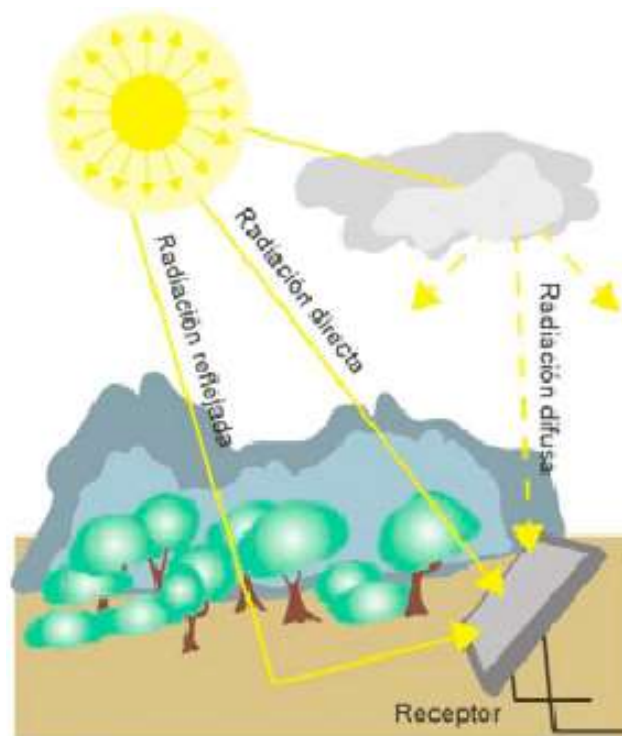


Figura 5. Componentes de la radiación solar

Fuente: Garnica et al. (2018)

1.3.3.4. Irradiación, irradiancia y horas solar pico

A continuación se definen parámetros que son de mucha importancia en el cálculo de sistemas fotovoltaicos.

Irradiancia: es la medida del flujo de potencia por unidad de superficie de la radiación solar y se mide en W/m^2 . Esta magnitud es, por tanto, una cantidad instantánea y, a menudo, se identifica como la intensidad de la luz solar. La constante solar de la Tierra es la irradiancia que recibe la Tierra del Sol en la zona superior de la atmósfera, es decir, en AM 0, y se estima en $1367 W / m^2$. Luego de atravesar la atmósfera con AM1, la irradiancia disminuye a aproximadamente $1 kW/m^2$. (Messenger y Abtahi, 2017)

Irradiación: medida de la energía solar por unidad de área de radiación solar incidente en una superficie colocada en un lugar y rango de tiempo bien definidos en kWh/m^2 . Técnicamente es la sumatoria, dentro de un lapso específico, de la irradiancia filtrada por la interposición de la atmósfera. Su

valor es fuertemente dependiente de la latitud, estación, las horas del día y las condiciones climáticas del lugar. (ECYT-AR, 2017)

La irradiación a menudo se expresa como **horas solar pico** (hsp). Esta nueva magnitud hace referencia al período de tiempo en horas a una intensidad de irradiación de 1000 W/m^2 necesario para producir la irradiación diaria obtenida de la integración de la irradiación durante todas las horas del día. La Figura 6 ilustra el resultado de esta integración para un ejemplo de día de sol con algunos momentos nublados. Tenga en cuenta que la figura traza la irradiación frente al tiempo para determinar la irradiación. La irradiación diaria es numéricamente igual a las horas solar pico (Reinders, 2017)

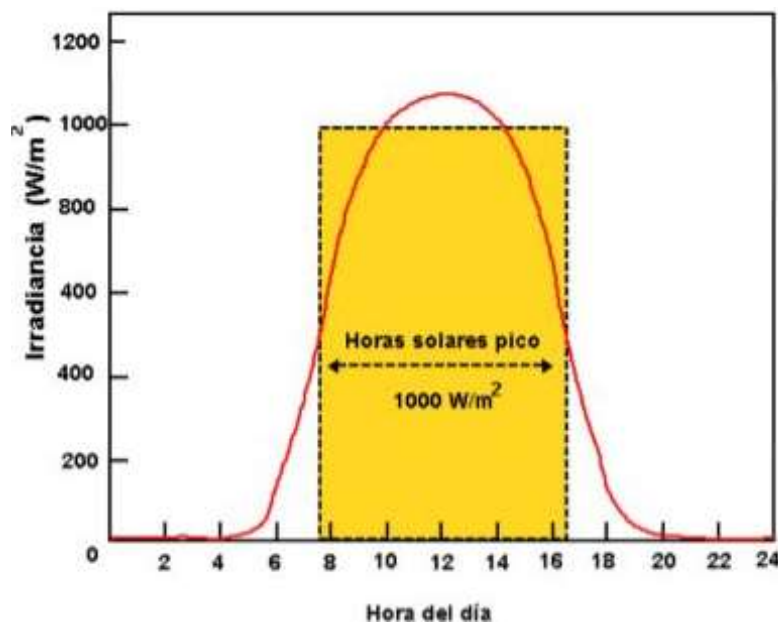


Figura 6. Irradiación en un día soleado normal y horas solar pico

Fuente: Pérez et al. (2017)

1.3.3.5. Medida de la radiación solar

Para el correcto dimensionado de un sistema fotovoltaico es imprescindible tener data sobre radiación solar disponible en el lugar específico en un momento dado. Según Quintero y Guinand (2020) se tienen los siguientes métodos para medir la radiación solar:

Medida de la radiación directa: este tipo de radiación se mide empleando pirheliómetros, los cuales es importante que estén en forma perpendicular las superficies receptoras a la dirección de sol. Si se emplean aperturas se logra medir únicamente la radiación que procede directamente del sol y es importante que no haya ninguna interferencia, en este se mira el anillo celeste, o llamado también como radiación de aureola.

Medida de la radiación global y difusa: Para medir la radiación global se recurre a los piranómetros. Existen muchos tipos de estos instrumentos cada uno de los cuales poseen sus propias características y miden la radiación semiesférica directa (global) y la difusa global.

Existen diversas formas de calcular la irradiancia incidente sobre superficies inclinadas en determinada zona y una de las menos complejas es apoyarse de plataformas virtuales que ofrecen datos de las nubes por satélite existentes, dentro de tales plataformas las que se emplearán en el presente trabajo de investigación son las siguientes:

- Data Access Viewer – NASA Prediction of Worldwide Energy Resources
- Solar Radiation Tool – Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

1.3.3.6. Radiación en superficies inclinadas

La irradiación global incidente sobre una superficie inclinada puede calcularse a partir de datos de irradiación global sobre una superficie horizontal. El cálculo inicia con los valores de irradiación global diaria en un plano horizontal. Luego, dependiendo del tipo de valores que se tiene, se aplica la ecuación matemática respectiva. Existen fórmulas que se aplican si se conocen medias mensuales para calcular las correspondientes medias mensuales de irradiación difusa y directa diaria incidente sobre superficies horizontales. Se tiene también una correlación para datos de series temporales de valores diarios y permiten el cálculo de valores diarios de irradiación difusa y directa diaria en el plano horizontal. Seguidamente, como procedimiento intermedio para realizar las conversiones al plano inclinado, se

estiman valores de irradiancia difusa, directa y global sobre una superficie horizontal. Una vez obtenida estas estimaciones en el plano horizontal se procede a determinar los valores correspondientes en el plano del generador. Realizando un proceso de integración sobre los valores de irradiancia obtendremos las estimaciones de irradiación diaria difusa, directa y global en el plano del generador. La denominación “incidente” señala que es el resultado de considerar la inclinación y orientación del generador. (Perpiñan, 2020)

1.3.3.7. Sistemas de seguimiento solar

Sopelia (2020) asegura que, un mejor aprovechamiento de la energía solar se da si la superficie de captación se coloca perpendicularmente a los rayos incidentes del sol, esto únicamente puede llevarse a cabo si la superficie de los generadores fotovoltaicos posee algún sistema de seguimiento solar.

Sistema estático: Generalmente, estos sistemas consisten en la operación de módulos fotovoltaicos fijos con orientación hacia la línea ecuatorial (hacia el sur en el hemisferio Norte y hacia el norte en el hemisferio Sur) con una inclinación que es función de la latitud. (Perpiñan, 2020)

Sistemas de doble eje: poseen movimiento bidireccional, una de las direcciones presenta alineación norte-sur y la otra este-oeste. El sistema de doble eje se funciona de tal forma que maximiza la generación de energía durante el periodo anual. Son capaces de cambiar la orientación según el periodo estacional y operan siguiendo el sol durante las horas de luz solar. Por todo lo expuesto, poseen un seguimiento solar más preciso que los de un eje y con mayores rendimientos; pero, su costo es más alto (Sotysolar, 2020)

Sistema de seguimiento acimutal: En “podio” de los seguidores que mejoran la generación se tiene el sistema de seguimiento acimutal, que elimina el movimiento de la inclinación del generador con el fin de obtener sistemas de menores costos. Consiste en una rotación este – oeste sobre un eje vertical. (Perpiñan, 2020)

Sistema de seguimiento polar: posee movimiento sobre un solo eje inclinado respecto de la superficie del terreno y casi paralelo al eje de rotación

terrestre. Este eje es como aquel alrededor del cual el sol aparente un movimiento en la bóveda celeste. El eje es parecido, pero no igual debido a las fluctuaciones en la elevación del trayecto solar referido al terreno en las diferentes estaciones. Es así que, este sistema de rotación logra posicionar el módulo perpendicular al sol durante todo el día y da la mayor eficiencia posible con un único eje de rotación (Planas, 2019).

Sistema de seguimiento horizontal: Sotysolar (2020) expresa que este sistema mueve el módulo solar sobre un eje, generalmente en alineación norte-sur. Este sistema le ofrece al módulo un movimiento este – oeste, siguiendo al sol desde el alba hasta el ocaso. Este es un sistema más barato, simple y capaz de adaptarse a cubiertas; sin embargo, se sacrifica la precisión del seguimiento solar, captando menores cantidades de energía.

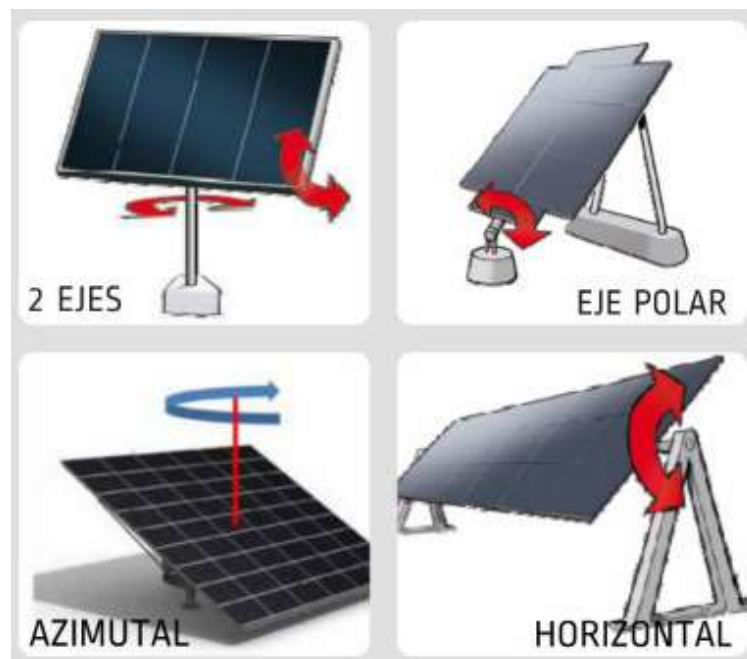


Figura 7. Tipos de seguidores solares

Fuente: Udimá (2021)

1.3.4. La celda solar

1.3.4.1. Efecto fotovoltaico

El fundamento del proceso en el cual una celda solar transforma la luz solar en energía eléctrica es el efecto fotovoltaico. La luz solar se compone

de fotones o partículas portadoras de energía, estas partículas presentan diferentes niveles de energía correspondientes a diferentes longitudes de onda dentro del espectro solar. En el momento en el que los fotones inciden sobre una célula solar, existe la posibilidad de que sean reflejados, absorbidos, o pueden atravesar la célula. Solo los fotones absorbidos producen electricidad. Con la absorción del fotón, su energía es transferida a un electrón de un átomo de la célula. El electrón, ahora con mayor cantidad de energía, puede escapar de su nivel energético dentro de la nube electrónica para constituir una corriente continua. Seguidamente, se bosqueja este efecto para un mejor entendimiento (Fernández y Cervantes, 2017).

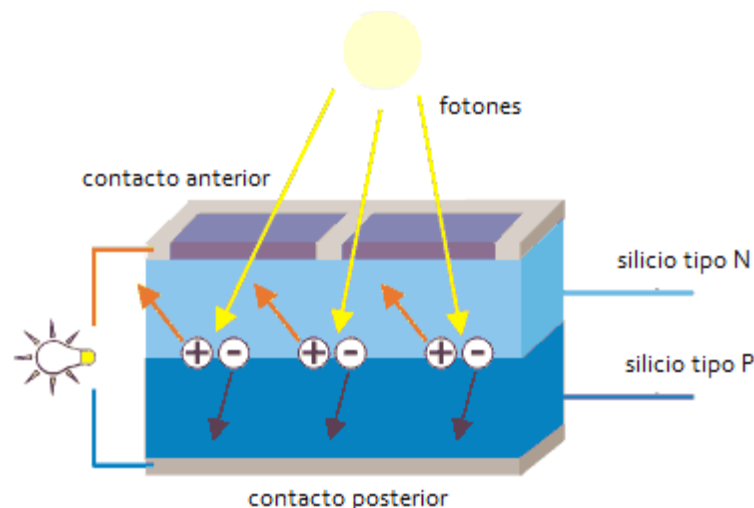


Figura 8. *Efecto fotovoltaico*

Fuente: Fernández y Cervantes (2017)

1.3.4.2. La celda solar fotovoltaica

Las células fotovoltaicas son dispositivos que pueden transformar la irradiación en energía eléctrica (AutoSolar, 2020).

Los componentes de mayor relevancia en una célula son las láminas de semiconductores, debido a que allí se genera la corriente continua.

Estos semiconductores reciben un tratamiento especial con la finalidad de obtener una capa dopada tipo P y otra tipo N y así generar un campo eléctrico, positivo de un lado y negativo del otro. En el momento en que la luz incide en la célula, se extraen muchos electrones y muchos de ellos quedan

capturados en el campo creando una corriente eléctrica. Por esta razón la materia prima para la fabricación de células fotovoltaicas son los semiconductores, materiales que en temperaturas bajas no conducen corriente eléctrica pero que cuando se calientan se comportan como conductores. Por desgracia no existe un material ideal para todos los tipos de células y aplicaciones (Fernández y Cervantes, 2017)

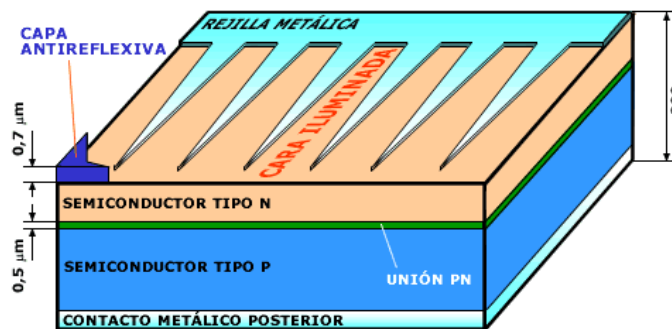


Figura 9. Celda solar fotovoltaica

Fuente: Fernández y Cervantes (2017)

1.3.4.3. Tipos de celdas fotovoltaica

Kamalvand (2020) expone los siguientes tipos de celdas fotovoltaicas:

Celdas de silicio monocristalino: Esta celda se compone silicio cristalino de elevada pureza, su eficiencia tiene un máximo 16 % en uso comercial y 24.7 % en situaciones controladas de laboratorio. Estos módulos ofrecen confiabilidad y los fabricantes garantizan una vida útil de 25 años.

Silicio policristalino: Con una superficie característica, de apariencia granulada. Para fabricar este tipo de células, trozos de silicio puro se transforman en líquido, luego se deja reposar y enfriar hasta que este solidificado para luego cortar las obleas y obtener las células. En laboratorio se han obtenido eficiencias de hasta 19.8 % y en uso comercial del 15 %.

Silicio amorfo: Su composición química posee elevados índices de defectos de estructura y su fabricación es de menor coste, el proceso consiste en depositar una fina capa de silicio amorfo en varias superficies. En cuanto a eficiencias, se tiene un máximo de 13 % en condiciones de laboratorio de 8% a escala comercial.

1.3.4.4. Curva característica de una celda solar

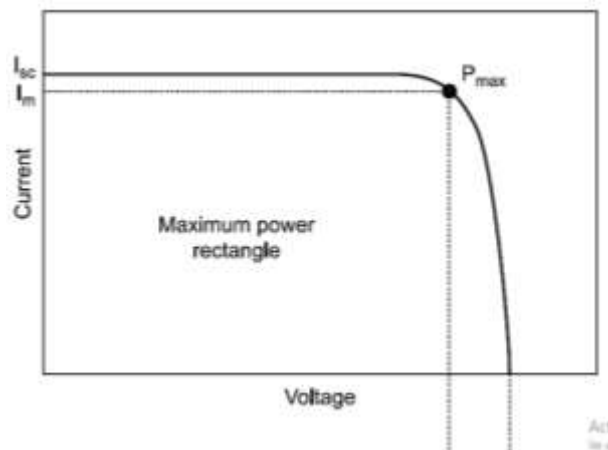
Según Markvarta y Castañer (2013) una célula solar ideal se puede representar mediante una fuente de corriente conectada en paralelo con un diodo rectificador. La curva característica $I - V$ correspondiente se describe mediante la ecuación de la celda solar de Shockley

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (1)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta, q (> 0) es la carga del electrón y V es la diferencia de potencial en los terminales de la celda. I_0 es bien conocido por los ingenieros de dispositivos electrónicos como la corriente de saturación del diodo. La corriente I_{ph} fotogenerada está estrechamente relacionada con el flujo de fotones incidente en la célula. La corriente fotogenerada suele ser independiente del voltaje aplicado, con posibles excepciones en el caso del a-Si y algunos otros materiales de película delgada.

La figura muestra la curva característica $I - V$ ideal de una celda solar típica, así como la potencia $P = IV$ producida por la celda. En el caso ideal, la corriente de cortocircuito I_{sc} ($V = 0$) es igual a la corriente fotogenerada I_{ph} , y la tensión de circuito abierto V_{oc} ($I = 0$) está dada por

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (2)$$



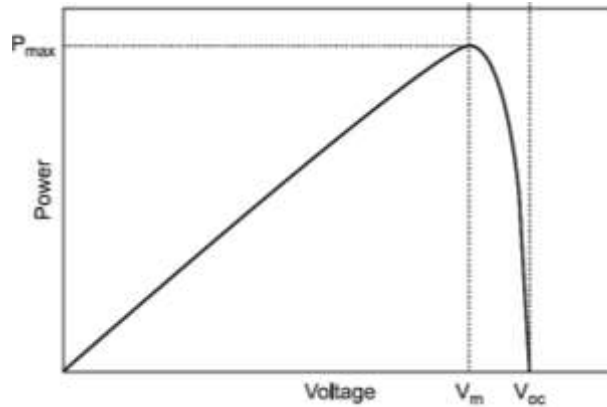


Figura 10. La curva característica $I - V$ de una célula solar ideal (a) y la energía producida por la celda (b). La potencia generada en el punto de máxima potencia es igual al rectángulo sombreado en (a).

Fuente: Markvarta y Castañer (2013)

La celda genera la potencia máxima $P_{m\acute{a}x}$ a un voltaje V_m y una corriente I_m , y es conveniente definir el factor de llenado FF por

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3)$$

Tenga en cuenta que las cantidades de corriente y voltaje disponibles de la celda dependen del nivel de iluminación de la celda. Tenga en cuenta también que el voltaje al que se producen los puntos de máxima potencia depende mínimamente del nivel de iluminación de la celda. (Messenger y Abtahi, 2017)

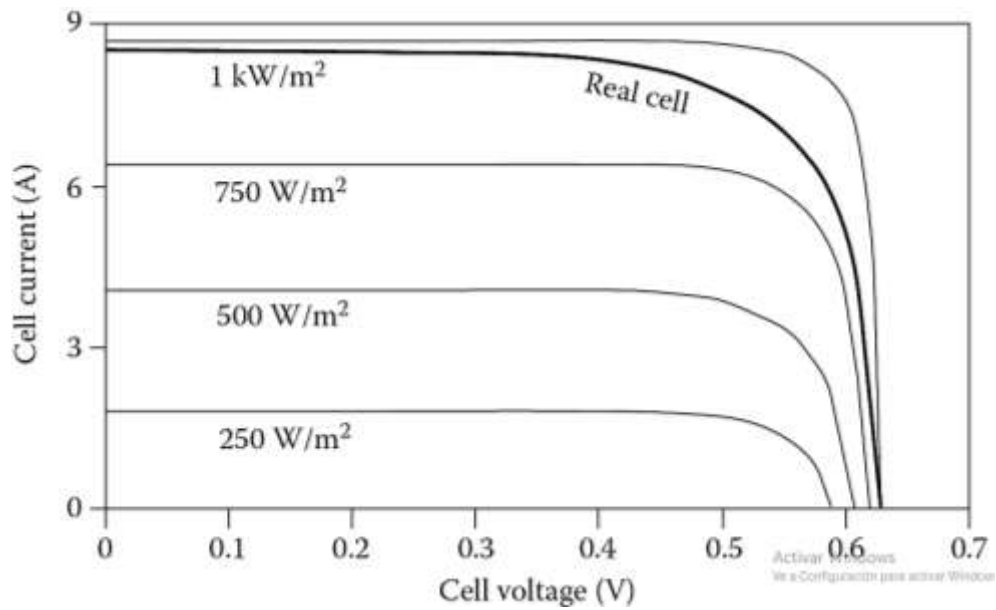


Figura 11. Curva característica $I - V$ de celdas reales e ideales bajo diferentes niveles de iluminación.

Fuente: Messenger y Abtahi (2017)

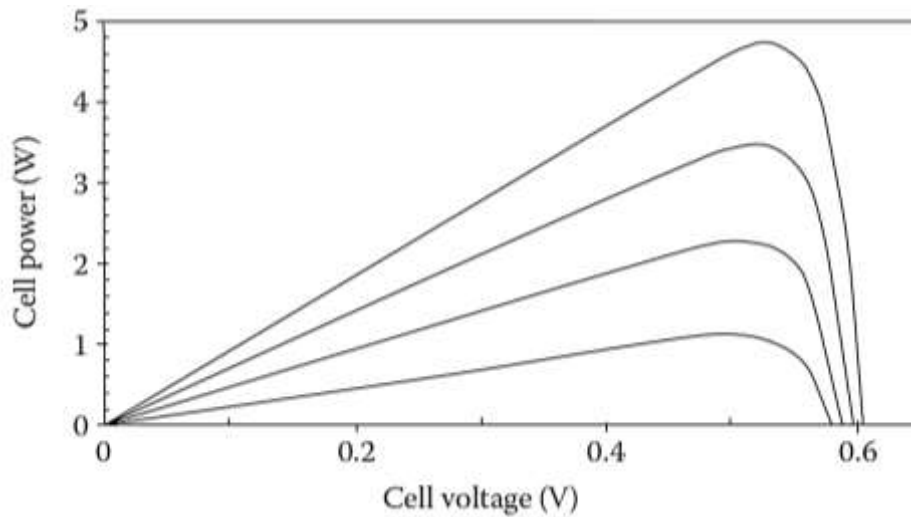


Figura 12. Potencia versus voltaje para una celda fotovoltaica para cuatro niveles de iluminación.

Fuente: Messenger y Abtahi (2017)

Markvarta y Castañer (2013) manifiestan que la curva $I - V$ de la celda fotovoltaica también es sensible a la temperatura. La diferencia de potencial

del circuito abierto de una celda fotovoltaica de silicio cristalino ideal disminuye en aproximadamente $2,3 \text{ mV} / ^\circ \text{C}$ de aumento de temperatura, lo que equivale aproximadamente a $0,4\% / ^\circ \text{C}$. La corriente de cortocircuito, por otro lado, aumenta solo ligeramente con la temperatura. Como resultado, la potencia de la celda también disminuye aproximadamente un $0,4\% / ^\circ \text{C}$.

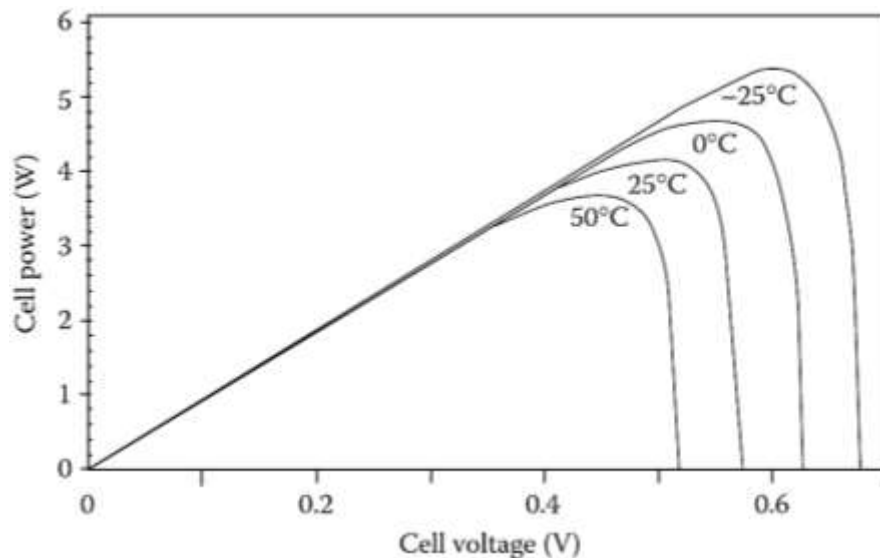


Figura 13. Dependencia de la temperatura de la curva de potencia versus voltaje para una celda fotovoltaica

Fuente: Messenger y Abtahi (2017)

Es importante recordar que cuando se ilumina una celda, generalmente convertirá menos del 22% de la irradiancia en electricidad. El resto se convierte en calor, lo que resulta en el calentamiento de la celda. Como resultado, se puede esperar que la celda funcione por encima de la temperatura ambiente.

1.3.5. Sistemas solares fotovoltaicos

1.3.5.1. Módulo fotovoltaico

También llamado generador fotovoltaico, es la fuente de potencia del sistema solar. Conformado por la asociación de células solares en serie y paralelo, y son estas las que captan la irradiación y la convierten en potencia eléctrica de corriente continua (CC). La cantidad de paneles es según la

potencia demandada que se desea abastecer y las conexiones son dependientes de la diferencia de potencial nominal del suministro y el amperaje que se desee tener (Vera y Mereles, 2009 citados por Pérez, 2019).

Alvarado (2018) expresa que, aunque hay paneles diferentes a los convencionales e incluso se puede fabricar un panel a medida, el número de celdas solares por lo general es de 36, 60 y 72. Son números prácticamente estandarizados que se emplean comercialmente a nivel mundial para objetivos comunes en las instalaciones. Por otro lado, existen una variedad de materiales empleados para la fabricación de módulos fotovoltaicos y las investigaciones intentan mejorar la eficiencia; sin embargo, el material ampliamente usado a nivel mundial debido a la relación eficiencia – costo es el silicio.

Una observación importante relacionada con la conexión en serie de las celdas fotovoltaicas se relaciona con el sombreado de las celdas individuales. Si alguna de las celdas de un módulo esta sombreada, su rendimiento se degradará. Dado que las celdas están en serie, esto significa que la celda puede polarizarse hacia adelante si otros módulos sin sombrear se conectan en paralelo, lo que da como resultado el calentamiento de la celda. Este fenómeno puede provocar un fallo celular prematuro. Para proteger el sistema contra tal falla, los módulos generalmente están protegidos con diodos de derivación. Si la corriente fotovoltaica no puede fluir a través de una o más de las celdas, en su lugar fluirá a través del diodo de derivación. (Perpiñan, 2020)

Messenger y Abtahi (2017) señalan que cuando las celdas se montan en módulos, a menudo se cubren con un revestimiento antirreflectante y luego con un laminado especial para evitar la degradación de los contactos de las celdas. La carcasa del módulo es generalmente de metal, lo que proporciona resistencia física al módulo. Cuando las células fotovoltaicas se montan en el módulo, se pueden caracterizar por tener una temperatura de célula de funcionamiento nominal (NOCT). El NOCT es la temperatura que alcanzarán las celdas cuando operen en circuito abierto en una temperatura ambiente T_a de 20° C en condiciones de irradiancia AM 1.5, $G = 800 \text{ W / m}^2$, y una

velocidad del viento menor de 1 m s^{-1} . Para variaciones en la temperatura ambiente y la irradiancia, la temperatura de la célula T_c (en $^{\circ} \text{C}$) se puede estimar con bastante precisión con la aproximación lineal siguiente:

$$T_c = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) G \quad (4)$$

Los efectos combinados de la irradiancia y la temperatura ambiente sobre el rendimiento de la celda merecen una consideración cuidadosa en los cálculos como lo veremos más adelante.

Otro parámetro importante de un panel fotovoltaico es la **potencia pico**, definida como el mayor valor de potencia que puede producir un módulo a 1 kW/m^2 , 25°C y 1.5 de masa de aire (Zeña 2018, citado por Kamalvand 2019)

1.3.5.2. Asociación de paneles fotovoltaicos

Una asociación de paneles fotovoltaicos no es más que la agrupación de estos (en serie y/o en paralelo) trabajando para un mismo fin, un mismo proyecto (Fernández y Cervantes, 2017)

1.3.5.3. Tipos de sistemas solares fotovoltaicos

Sistema fotovoltaico conectado a red (on grid): Córdoba (2020) indica que este tipo de sistema es aquel que opera empleando tanto el servicio de red eléctrica convencional como el sistema generador fotovoltaico. Este sistema posee los siguientes componentes: Red pública, generadores fotovoltaicos, Inversor de Red y un equipo de medición y monitoreo. Como consecuencia del uso de la red pública eléctrica, no se necesita de baterías. Resultando, en una disminución de la energía demanda de la red. Durante las noches y en días nublados, el inversor permite la entrada de energía proveniente de la red. El uso de este sistema solar conectado a red puede ser residencial, comercial e industrial y la mayor ventaja que presenta es el ahorro en costos energéticos y la reducción de emisión de CO_2 . Su instalación es bastante sencilla y económica. Muchos países ya se encuentran incorporando reglamentos de Generación Distribuida. En definitiva, ello

permitirá aprovechar la energía generada excedente -es decir, la que los paneles generaron y no se utilizaron - como un crédito de energía a futuro.

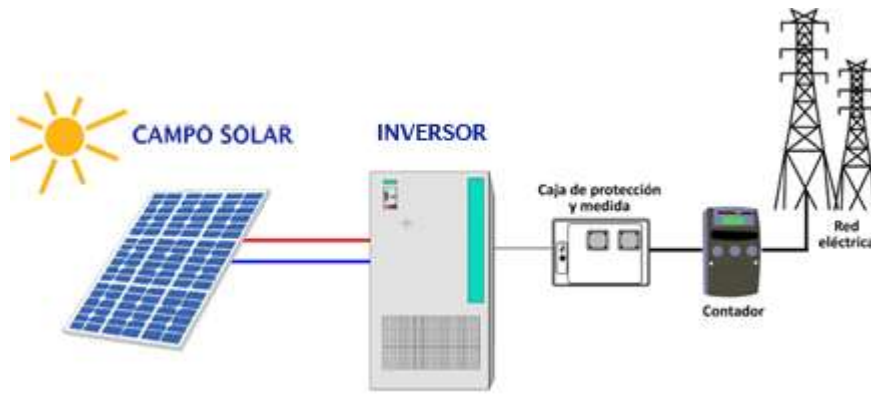


Figura 14. Sistema conectado a red

Fuente: Sopelia (2016)

Sistema fotovoltaico no conectado a red (off grid): Por lo general, son sistemas que se aplican en lugares remotos o aislados de la red pública de servicio eléctrico, en donde su uso justifica el relativo elevado costo tipo de tecnología. Los SF no conectados a red eléctrica se pueden clasificar en dos tipos: *a) Sistema fotovoltaico autónomo (SFA)*, son capaces de abastecer de energía eléctrica para uso domiciliario o instalaciones mayores como centros de salud, escuelas u otro tipo de edificaciones *b) Mini red solar fotovoltaica*, Es una instalación de generación solar fotovoltaica de baja potencia, que tiene por finalidad el abastecimiento de energía eléctrica a pequeñas comunidades rurales, cuyas demandas individuales son de baja potencia (Espinoza y Zanoni, 2021).

Sistema fotovoltaico de bombeo: Raboso (2013), citado por Asmat (2018) expresa que, es el conjunto de elementos eléctricos, electrónicos, mecánicos, que se emplean para aprovechar la energía solar disponible para su posterior conversión de energía eléctrica a energía hidráulica. Dependiendo de su configuración y potencia producida. El sistema de riego basado en energía solar consta de un panel solar para proporcionar energía eléctrica, una bomba y algún tipo de sistema de distribución de agua. La bomba extrae el agua del nivel del agua subterránea y opcionalmente la

almacena en el tanque de almacenamiento. Desde el tanque, el agua pasa por tuberías al campo en forma de riego por goteo con la ayuda de una bomba de presión. (Singh et al., 2021)

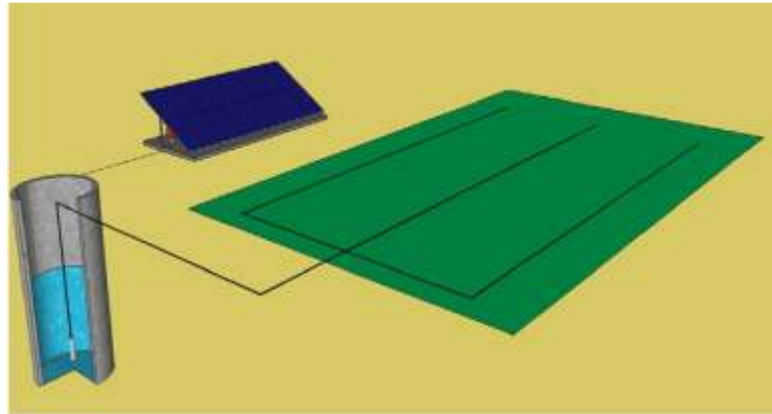


Figura 15. Sistema de bombeo solar sin sistema de almacenamiento

Fuente: Singh et al., 2021.

1.3.5.4. Componentes de sistema fotovoltaico autónomo

Passos et al. (2018) citado por Espinoza y Zanoni (2021) afirma que los elementos de un sistema autónomo, generalmente, son; módulos solares, controlador de carga, baterías e inversor.



Figura 16. Elementos básicos de instalación autónoma

Fuente: Córdoba (2020)

Generador fotovoltaico: es la agrupación de módulos solares a fin de satisfacer ciertos requerimientos de algún suministro en particular. Se constituye de un total de $N_p \cdot N_s$ módulos, siendo N_p el número de strings y N_s el número de módulos en cada serie. La corriente que finalmente entrega el generador la define el número de strings, $I_g = N_p \cdot I_m$, y la diferencia de potencial del sistema generador es fijada por los módulos en serie, $V_g = N_s \cdot V_m$ (Perpiñan, 2020).

Baterías: Alvarado (2018) expone que es necesario el almacenamiento de energía eléctrica ya que no podemos generar electricidad mediante los paneles por las noches o en días donde las condiciones climatológicas no sean favorables, es para ello que se tienen las baterías o acumuladores, componentes que ofrecen un suministro garantizado. Un banco de baterías se dimensiona para un número de días de autonomía de reserva que es definido con anterioridad. Las variables de relevancia para el cálculo de acumuladores son: la capacidad de almacenamiento, medida en Ah; voltaje de operación del banco de baterías, el cual será de la misma magnitud que la diferencia de potencial de la instalación; y su intensidad de trabajo, también acorde a los parámetros de instalación.

Controlador: Dispositivo cuya función es la de controlar y regular el flujo de corriente que se dirige del generador fotovoltaico hacia los acumuladores. Mientras los acumuladores están siendo cargados el controlador opera como un interruptor cerrado y se abre cuando la carga de baterías está completa. Así, el controlador de carga modera la manera en la que se carga el banco de baterías cuando los paneles solares están recibiendo irradiación, reduciendo la posibilidad de alguna carga extrema. E inversamente, durante el tiempo de demanda de energía eléctrica en el domicilio, este componente evita las descargas extremas que puedan reducir el tiempo de vida útil de los acumuladores (Ruíz, 2010 citado por Pérez, 2019)

Inversor CD/CA: es un dispositivo electrónico de potencia cuyo trabajo consiste en convertir la corriente directa (CD), producida en el sistema generador, en una corriente alterna (CA) que posea características

compatibles con los parámetros de la red pública (como voltaje y frecuencia), con la finalidad de que no se presenten alteraciones en la red de distribución del suministro eléctrico en las residencias. A su vez, el inversor CD/CA debe cumplir con ciertos requisitos como alta eficiencia, bajo consumo en vacío, alta fiabilidad, protección contra cortocircuitos, seguridad y buena regulación de la tensión y frecuencia de salida (Ruíz, 2010 citado por Pérez, 2019)

Cables eléctricos: Fernández y Cervantes (2017) afirman que los conductores eléctricos forman parte vital de un proyecto de instalación de un sistema solar fotovoltaico. Los tipos de conductores más usados para instalaciones fotovoltaicas domiciliarias y de escala comercial son el cobre y el aluminio. El cobre posee una conductividad mayor que el aluminio, por lo tanto, cuando se usa cobre, la sección es menor comparada con una sección de aluminio. Los cables de aluminio pueden ser debilitados en el proceso de instalación, específicamente cuando se da la flexión del material, pero tiene la ventaja de su bajo costo frente a conductores de cobre. Estos conductores no se emplean (no está permitido) para cableado de interiores; se emplean con secciones más grandes para las entradas de servicio subterráneo o aéreo y operaciones comerciales.

1.3.5.5. Componentes de sistema fotovoltaico de bombeo

Hervias (2018) expresa que una típica instalación de este tipo está conformada generalmente por un generador fotovoltaico, un motor/bomba, un conjunto de tuberías y tanque elevado, y también puede constituirse de sistemas de acondicionamiento de potencia (controladores CD/CD, inversores CD/CA u otros mecanismos electrónicos) de conexión entre el generador FV al motor, a fin de ser capaz de arrancar motores AC o para aumentar el rendimiento diario promedio en sistemas con motores CD que operen bombas de desplazamiento positivo. El sistema en general debe poseer mecanismos de protección, como sensores de nivel para el pozo tubular y para el tanque elevado a fin de eliminar potenciales desperdicios del recurso hídrico y evitar la operación en vacío de la electrobomba. En este tipo de aplicaciones es de uso corriente una bomba del tipo sumergible en un pozo de sondeo.

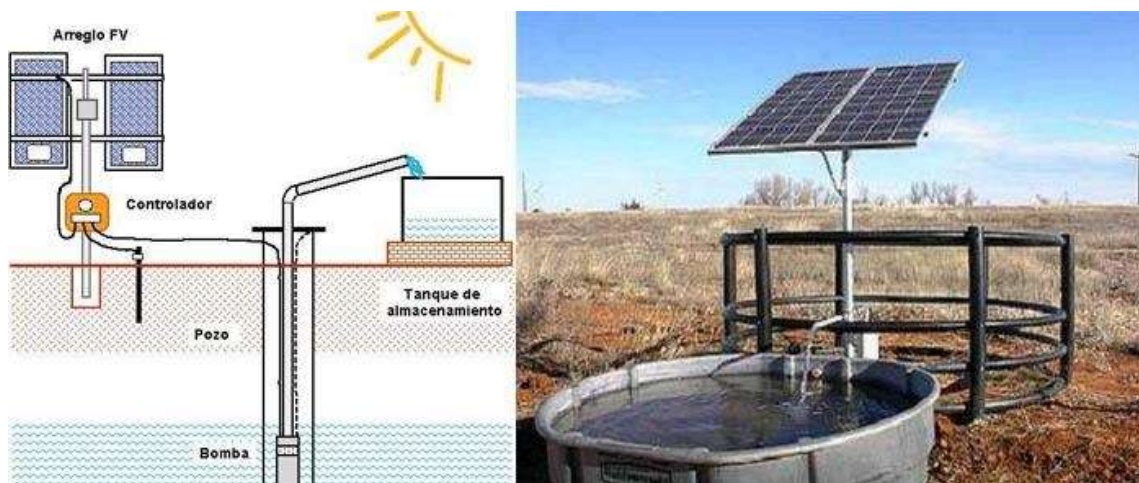


Figura 17. Componentes de sistema de bombeo solar

Fuente: AutoSolar (2015)

Generador fotovoltaico: elemento que está constituido por un arreglo de módulos (los cuales se conforman de células solares) ya sea en serie y/o paralelo y cuya función es convertir irradiancia en electricidad (Hervias, 2018).

Motobomba: máquina conformada por un motor eléctrico que acciona una bomba hidráulica.

Bomba hidráulica: de acuerdo con Perpiñan (2020), una bomba es una máquina hidráulica con la capacidad de convertir energía mecánica presente en el giro de un rotor en energía hidráulica del fluido. Cuando aumenta la energía del flujo de agua, se incrementa su presión, su velocidad o su altura, donde todas estas variables se relacionan mediante la conservación de la energía manifestada en la ecuación de Bernoulli. Cada tipo de bomba modifica algún valor de cierta variable para transportar el agua.

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g \cdot \Delta h = \text{constante} \quad (5)$$

donde p la presión, ρ la densidad del fluido, v la velocidad, g la gravedad y h la altura. Las bombas hidráulicas del tipo *rotodinámicas* se fundamentan en la adición de momentum al fluido. Esta clase de bombas poseen uno o varios rotores con paletas que al girar producen un campo de presiones en el fluido. Un tipo de bomba rotodinámica a destacar son las **bombas radiales o**

centrífugas en las que el fluido hace su ingreso por el centro del rotor, el que posee unas paletas para redireccionar adecuadamente el fluido, y mediante fuerza centrífuga se impele hacia el exterior, llegando exactamente a la carcasa de la bomba. Las bombas centrífugas se diseñan para vencer presiones relativamente uniformes, ofreciendo elevados flujos para reducidas alturas manométricas, y su operación es adecuada con torques de arranque bajos. Para que esta bomba alcance mayores alturas, se deben agregar etapas en serie. Son máquinas hidráulicas sencillas, robustas y económicas.

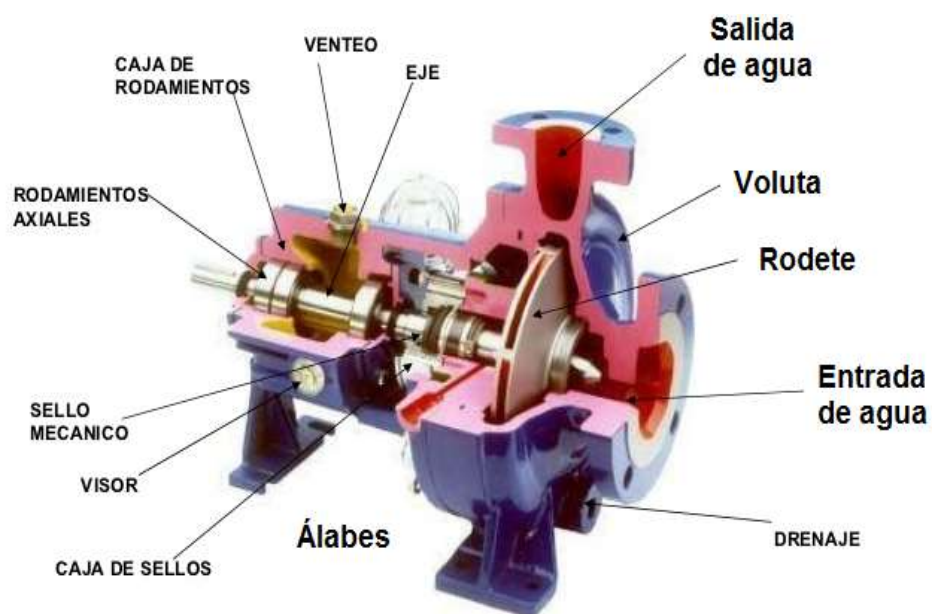


Figura 18. *Componentes de una bomba centrífuga*

Fuente: El bombero n°13 (2015)

Perpiñan (2020) manifiesta que según la disposición de la bomba puede diferenciarse tres tipos: bombas sumergibles, flotantes y de superficie. Las primeras usualmente integran una sola máquina con el motor y ofrecen mejores ventajas para extraer agua de subsuelo con pozos de pequeño diámetro. Las bombas flotantes son empleadas en ríos, lagos o pozos de gran diámetro, sitios con gran flujo volumétrico pero muy poca altura manométrica. Por último, las bombas de superficie realizan su trabajo por aspiración a nivel del terreno, haciendo más fácil las labores de mantenimiento. Considérese

que el nivel de aspiración es limitado y que, cuando se emplea agua como líquido para lubricación, no se debe operar en seco a fin de evitar sobrecalentamiento.



Figura 19. *Instalación de bombeo con bomba sumergible*

Fuente: CINBO (2013)

Nuero (2018) señala que la curva característica es una aquella que muestra en una sola gráfica las relaciones que existen entre los parámetros más importantes de una bomba. Cuando se calcula esta curva, todos los datos usados deben quedar expuestos en esta curva característica. Las variables de mayor relevancia que pueden apreciarse en una curva característica de una bomba son: 1.- Capacidad: es el gasto que impele la bomba. Expresada generalmente en m^3/h , pero en bombas de poco caudal se puede usar l/s ; 2.- Altura geométrica: es la altura a la cual se debe elevar el flujo volumétrico, medida en metros; 3.- Consumo de energía: expresa la demanda energética del motor que acciona la bomba centrífuga. Se mide generalmente en kW y 4.- Rendimiento hidráulico: parámetro adimensional que indica la eficiencia de

la bomba en un punto de operación específico. Se puede expresar como porcentaje (%).

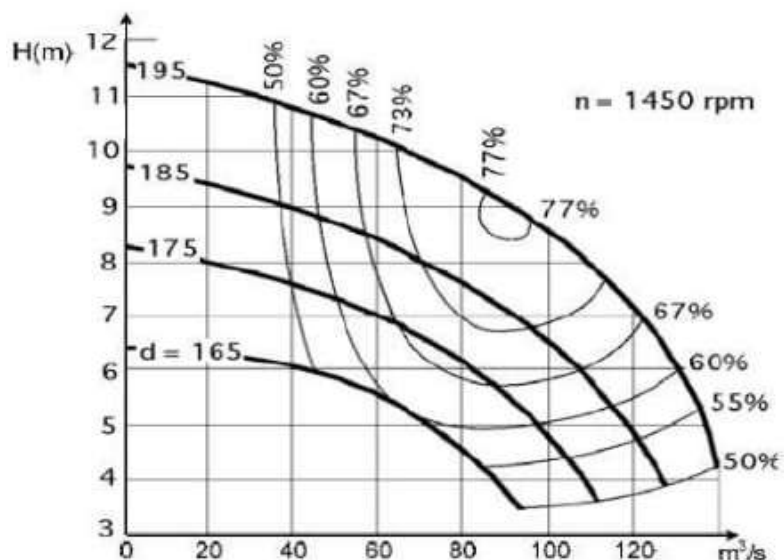


Figura 20. Curva característica de una bomba centrífuga

Fuente: Santa de Coro (2014)

Circuito hidráulico: constituye una serie de accesorios que definen completamente la instalación desde la salida del pozo hasta el último punto de suministro, pasando por el almacenamiento en tanque elevado cuando sea necesario. Está conformado por: la tubería de impulsión, el tanque elevado, la boca de pozo, la tubería de distribución y válvulas y/o dispositivos de control y medida de flujo (Perpiñan, 2020).

1.3.6. Diseño general de un sistema fotovoltaico aislado

1.3.6.1. Ángulo de inclinación óptimo y recurso solar

Ángulo de inclinación óptimo (β_{opt}): La generación de energía eléctrica mediante el panel alcanza valores máximos si la superficie expuesta del módulo es orientada hacia el Ecuador terrestre, vale decir, hacia el norte si la instalación se ubica en el hemisferio sur y viceversa (Espinoza y Zanoni). Además, Castejón y Santamaria (2010) señalan que, para determinar el ángulo óptimo de inclinación de los generadores fotovoltaicos, se puede

aplicar con gran precisión la siguiente relación, la cual se sustenta en estimaciones estadísticas llevadas a cabo en lugares de diferentes latitudes

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 \cdot |\phi| \quad (6)$$

Siendo ϕ la latitud del lugar donde se realizará la instalación, en grados sexagesimales.

Alternativamente, Kyocera (s/f) citado por Mu (2010) enumera en la siguiente tabla los ángulos de inclinación recomendados para un sistema fijo.

Tabla 1. *Ángulo de inclinación en función de latitud*

Latitud: $ \phi $ en grados	Ángulo de inclinación fijo: β en grados
$0^\circ \leq \phi < 15^\circ$	= 15
$15^\circ \leq \phi < 25^\circ$	= $ \phi $
$25^\circ \leq \phi < 30^\circ$	= $ \phi + 5$
$30^\circ \leq \phi < 35^\circ$	= $ \phi + 10$
$35^\circ \leq \phi < 40^\circ$	= $ \phi + 15$
$40^\circ \leq \phi $	= $ \phi + 20$

Fuente: Mu (2010)

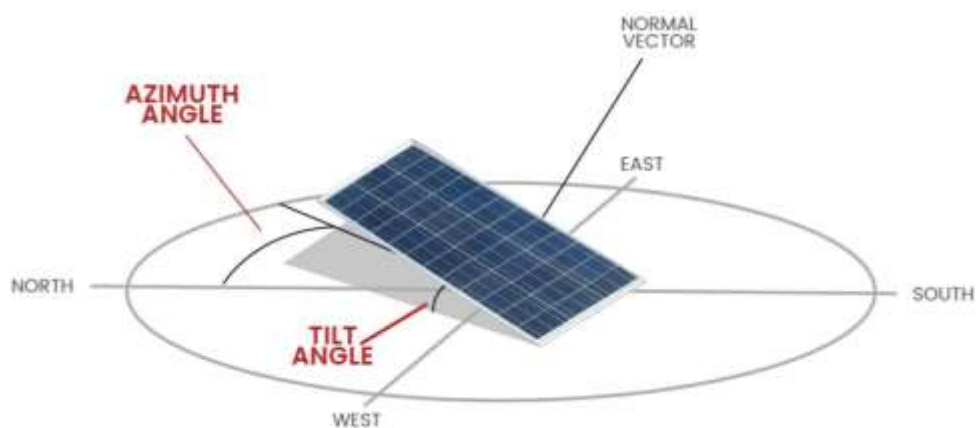


Figura 21. *Ángulo de inclinación de panel fotovoltaico (tilt angle)*

Fuente: Prostar (2020)

Estimación Recurso solar - Irradiancia: Para el diseño de sistemas fotovoltaicos necesitamos conocer la cantidad de energía solar que incide sobre determinada zona, es decir, la irradiación. Existen diversos medios para determinarla y en el desarrollo de esta aplicación se emplea información meteorológica y la data ofrecida por la plataforma Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).

1.3.6.2. Cálculo de la demanda energética

Abad y Flores (2017) manifiestan que el consumo energético es de relevancia en muchos aspectos de la instalación, por lo que cuando se consideran las necesidades de consumo de energía eléctrica es necesario tener presente todo lo relacionado con los diversos dispositivos eléctricos que conformarán la carga del sistema. Es así que se calcula la energía que el usuario necesitará diariamente. Para ello se tiene que conocer la potencia de todos los aparatos consumidores de electricidad, individualmente, junto con el periodo medio de uso de cada uno de ellos. En caso de duda, tanto la potencia como el tiempo medio de uso se deberán redondear hacia arriba. Una vez que se han determinado tanto las potencias como tiempos de consumo, se aplica la siguiente relación para hallar la energía demandada tanto por los artefactos de corriente alterna como los de corriente continua:

$$E_{ac} = \sum P_{i(ac)} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$E_{dc} = \sum P_{i(dc)} \cdot \Delta t \quad (8)$$

Donde

E_{ac} : Demanda en AC (Wh)

E_{dc} : Demanda en DC (Wh)

P_i : Potencia Nominal (W)

Δt : Tiempo diario de uso (h)

1.3.6.3. Cálculo del rendimiento global de instalación

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico off grid con acumulación debemos considerar además de la energía teórica requerida por día $E_{dc} + E_{ac}$, las pérdidas asociadas con toda la instalación y sus diversos

componentes para con ello calcular la energía real E_T que va a consumir el sistema. Luego

$$E_T = \frac{E_{dc}}{\eta_{bat}} + \frac{E_{ac}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \quad (9)$$

Donde

η_{bat} : Rendimiento de la batería

η_{inv} : Rendimiento del inversor

Existe un método alternativo para calcular E_T , es aquel que considera el rendimiento global de la instalación y aplica cuando la instalación final de la vivienda o lugar estará en corriente alterna. Se utilizará la siguiente relación

$$E_T = \frac{E_{ac}}{R} \quad (10)$$

Donde **R** es el rendimiento global de la instalación, parámetro que incluye diferentes factores que originan pérdidas en todo el sistema. Se define como:

$$R = (1 - k_b - k_i - k_r - k_v) \cdot \left(1 - k_a \cdot \frac{N}{P_d}\right) \quad (11)$$

Donde

k_b : coeficiente de pérdidas por rendimiento de las baterías

k_i : coeficiente de pérdidas por rendimiento del inversor

k_r : coeficiente de pérdidas en el regulador de carga

k_v : coeficiente de otras pérdidas

k_a : coeficiente de pérdidas de energía por autodescarga

N : cantidad de días de autonomía de toda la instalación

P_d : profundidad máxima de descarga admisible

Algunos valores típicos de estos parámetros se muestran a continuación.

Tabla 2. Valores de parámetros recomendados

Pérdidas en el proceso de acumulación	K_b
Acumuladores nuevos, cero descargas intensas	0.05
Acumuladores viejos, descargas intensas, temperaturas bajas	0.1
Autodescarga de la batería	K_a
Baterías de baja autodescarga, sin mantenimiento	0.002
Baterías estacionarias de energía solar	0.005
Baterías de alta autodescarga	0.012
Pérdidas por el rendimiento del inversor	K_i
No existe inversor en la instalación	0
Rendimiento inversor 95%	0.05
Rendimiento inversor 90%	0.1
Rendimiento inversor 85%	0.15
Rendimiento inversor < 85%	0.2
Otras pérdidas no consideradas	K_v
Si no se tiene en cuenta pérdidas en cableado y equipos	0.15
Si se ha realizado un estudio detallado de pérdidas en equipos	0.05
Profundidad de descarga máxima admisible	P_d
Batería descargada hasta el 90%	0.9
Batería descargada hasta el 80%	0.8
Batería descargada hasta el 70%	0.7
Batería descargada hasta el 60%	0.6
Batería descargada hasta el 50%	0.5
Batería descargada hasta el 40%	0.4
Batería descargada hasta el 30%	0.3
Número de días de autonomía	n
Vivienda fines de semana	3

Vivienda habitual	5
Instalaciones especiales con servicio prioritario	15
Instalaciones especiales alta fiabilidad	20
Pérdidas en el regulador de carga	K_r
Regulador de carga eficiente	0.1
Regulador de carga antiguo, poco eficiente	0.15

1.3.6.4. Cálculo de paneles fotovoltaicos

El dimensionado del generador fotovoltaico se realiza considerando principalmente la demanda energética de la instalación y la irradiación solar que se recibe en el lugar. Para realizar este dimensionado es imprescindible delimitar un periodo de diseño que básicamente consiste en hacer una distribución de los consumos de energía eléctrica a lo largo del año y decidir aquel intervalo de tiempo donde la relación generación/consumo va a ser más desfavorable. Para una instalación con demanda constante durante todo el año, el periodo de diseño se establece para el «mes peor» que será el mes de menor radiación solar (Castejón y Santamaría, 2010).

La metodología de cálculo a emplear requiere de las HSP en el lugar donde se dará la instalación, luego, las HSP se calcula mediante la siguiente relación

$$HSP = \frac{\text{Irradiación diaria en Wh/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (12)$$

Potencia teórica del generador (P_{G1}): Es la potencia que se debe producir o instalar mediante el número de módulos o paneles fotovoltaicos en base a la irradiación existente en la zona donde se implementará el proyecto. Según Baldera (2018) citado por Ventura y Delgado (2020):

$$P_{G1} = \frac{E_T}{HSP} \quad (13)$$

Voltaje del sistema (V): Para determinar el voltaje del sistema se tienen las recomendaciones de la tabla siguiente:

Tabla 3. Voltaje para sistemas fotovoltaicos

Potencia del generador P_G	Voltaje Nominal $V_{nom, sist}$
$P_G \leq 800 \text{ W}$	12 V
$800 < P_G \leq 1600 \text{ W}$	24 V
$1600 < P_G \leq 3200 \text{ W}$	48 V
$3200 < P_G$	120 o 300 V

Fuente: Castejón y Santamaria (2010)

Corrección por temperatura a las características del panel: El efecto que tiene la temperatura sobre un panel es muy importante y debe considerarse en los cálculos ya que, sucede que, al aumentar la temperatura ambiente, menor será la potencia de salida del módulo fotovoltaico.

La temperatura del módulo tiene un impacto frontal sobre la capacidad de entrega de potencia. Este impacto se considera mediante el coeficiente de temperatura. Expresado como una reducción porcentual en la generación por cada incremento de una unidad de °C en temperatura desde 25 °C. Es así que, empleando los coeficientes de temperatura del punto de máxima potencia (CT_{mpp}), de voltaje en circuito abierto (CT_{Voc}) y de corriente en cortocircuito (CT_{Isc}) se corrigen los parámetros respectivos para un cálculo más preciso de la máxima potencia de un panel y tener mayor confiabilidad en el sistema. Estos coeficientes se incluyen en las fichas técnicas de la mayoría de paneles (ECO GREEN ENERGY, 2021) Se emplean las siguientes ecuaciones

$$\Delta P_{m\acute{a}x} = (T_{c,m\acute{a}x} - 25) \cdot CT_{mpp} \quad (14)$$

$$\Delta V_{oc} = (T_{c,m\acute{a}x} - 25) \cdot CT_{Voc} \quad (15)$$

$$\Delta I_{sc} = (T_{c,m\acute{a}x} - 25) \cdot CT_{Isc} \quad (16)$$

Donde

$\Delta P_{m\acute{a}x}$: Variación máxima de potencia, expresada en porcentaje

ΔV_{oc} : Variación en voltaje de circuito abierto, expresada en porcentaje
 ΔI_{sc} : Variación en corriente de cortocircuito, expresada en porcentaje
 Potencia máxima, voltaje en circuito abierto y corriente de cortocircuito corregidos

$$P_{m\acute{a}x, corr} = P_{m\acute{a}x} (1 + \Delta P_{m\acute{a}x}/100) \quad (17)$$

$$V_{oc, corr} = V_{oc} (1 + \Delta V_{oc}/100) \quad (18)$$

$$I_{sc, corr} = I_{sc} (1 + \Delta I_{sc}/100) \quad (19)$$

Número de módulos fotovoltaicos: Ventura y Delgado (2020) exponen las siguientes ecuaciones para calcular la cantidad de paneles fotovoltaicos y el arreglo serie-paralelo correspondiente:

$$N = \frac{P_G}{P_{m\acute{a}x, corr}} \quad (20)$$

A fin de mantener la corriente y elevar la tensión de operación se debería agrupar los paneles en serie

$$N_{serie} = \frac{V_{nom-sist}}{V_{mpp}} \quad (21)$$

A su vez, para mantener la tensión e incrementar la corriente del sistema se debería agrupar los paneles en paralelo

$$N_{paralelo} = \frac{P_G}{P_{m\acute{a}x, corr} \cdot N_{serie}} \quad (22)$$

Donde

N : Número total de módulos fotovoltaicos

N_{serie} : Número de paneles en serie

$N_{paralelo}$: Número de paneles en paralelo

Finalmente se emplean las siguientes relaciones para terminar con el dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos:

$$V_{oc-serie} = N_{serie} \cdot V_{oc, corr} \quad (23)$$

$$I_{sc-paralelo} = N_{paralelo} \cdot I_{sc, corr} \quad (24)$$

$$P_G = N \cdot P_{m\acute{a}x, corr} \quad (25)$$

1.3.6.5. Cálculo de banco de baterías

Abad y Flores (2017) señalan como parámetros fundamentales para el dimensionado de acumuladores a la profundidad de descarga admisible y el número de días de autonomía. A continuación, se da una breve descripción de dichos parámetros

Profundidad de descarga admisible: Es la máxima descarga permisible para la batería antes de la desconexión del regulador, para proteger su tiempo de vida útil. En acumuladores estacionarios de plomo-ácido un valor adecuado es de 0.6.

Días de Autonomía: son los días seguidos que, en ausencia de irradiación solar, el sistema de acumulación es capaz suministrar la energía requerida, sin exceder el límite la profundidad máxima de descarga de la batería. Los días de autonomía posibles, dependen entre otros factores del tipo de instalación y de las condiciones climatológicas del emplazamiento.

Las siguientes relaciones permiten el dimensionamiento del banco de baterías:

$$C_n \text{ (Ah)} = \frac{E_T \cdot n}{V_{\text{nom-sist}} \cdot P_d} \quad (26)$$

$$N_{\text{bat-serie}} = V_{\text{nom, sist}} / V_{\text{bat}} \quad (27)$$

$$N_{\text{bat-paralelo}} = \text{Capacidad (banco)} / \text{Capacidad (batería)} \quad (28)$$

$$N_{\text{bat}} = N_{\text{bat-serie}} \cdot N_{\text{bat-paralelo}} \quad (29)$$

Donde

C_n	:	Capacidad del banco de baterías
N_{bat}	:	Número de baterías
$N_{\text{bat-serie}}$:	Arreglo de baterías en serie
$N_{\text{bat-paralelo}}$:	Arreglo de baterías en paralelo

1.3.6.6. Cálculo del controlador de carga

Espinoza y Zanoni (2021) afirman que el controlador o regulador solar recepciona la energía que se genera a través de los módulos fotovoltaicos y la cede hacia los acumuladores. En la elección de este dispositivo se aplica el

criterio de la peor condición, la cual se da con la máxima intensidad de corriente que pueden generar los módulos, es decir, la corriente de cortocircuito, de la adición de las derivaciones con módulos en arreglo paralelo. Dicha cantidad se hallará del producto de la corriente de cortocircuito por el número de paneles conectados en paralelo. Con ello se determina la máxima corriente nominal a la cual trabajará el controlador. Por seguridad, se realiza un ligero sobredimensionamiento en dicha corriente, multiplicándola por un factor de seguridad f_s de incremento que puede ser del 25%.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se tiene que la corriente del controlador I_{cont} debe de ser

$$I_{cont} > I_{sc-paralelo} \cdot f_s \quad (30)$$

1.3.6.7. Cálculo del inversor

Abad y Flores (2017) manifiestan que los parámetros que definen la correcta operación de un CD – CA son: potencia nominal, diferencia de potencial de entrada y salida, frecuencia de operación y rendimiento.

El dimensionamiento y selección del inversor depende de la cantidad de watts que demanda la carga CA, de modo que el tamaño y la potencia nominal del inversor deberán ser un poco mayor que la máxima demanda de la carga. Sin embargo, el sobredimensionamiento no debe ser excesivo a fin de trabajar en la zona de mayor rendimiento del inversor seleccionado.

Se considera la siguiente relación para el cálculo de la potencia del inversor:

$$P_{inv} = P_{ins} \cdot f_{si} \quad (31)$$

Donde

P_{inv}	:	Potencia del inversor en W
P_{ins}	:	Potencia instalada en W
f_{si}	:	Factor de simultaneidad

1.3.6.8. Cálculo de calibre de cables

Para evitar que la caída de voltaje en un circuito eléctrico sobrepase un valor prefijado (generalmente el 5%), los conductores deberán poseer una sección transversal superior al valor calculado según la expresión:

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I}{\% \Delta V} \quad (32)$$

Donde

S	:	sección del conductor	-	mm ²
L	:	longitud del conductor	-	m
I	:	corriente eléctrica	-	A
%ΔV	:	caída de tensión	-	V
ρ	:	conductividad del conductor	-	0.022 Ωmm ² /m (Cobre)

1.3.7. Diseño de sistema fotovoltaico de bombeo

Según Asmat (2018), en el diseño de un parque fotovoltaico autónomo para bombeo solar se presentan dos posibilidades: el bombeo solar directo o bombeo solar con almacenamiento de energía en acumuladores. En el primer caso, el bombeo de agua solo se da cuando existe irradiación disponible en la zona; sin embargo, para ello una solución consiste en emplear tanques elevados. Por el otro lado, en los sistemas de bombeo solar empleando acumuladores, la energía eléctrica se almacena en forma de energía electroquímica para ser usada en momentos con bajos niveles de irradiación.

1.3.7.1. Cálculo de la demanda hídrica

Dávalos (2019) manifiesta que al momento de dimensionar un sistema de bombeo solar se debe considerar la etapa en la que se demanda mayores cantidades de agua para el sembrío. Además, Asmat (2018) expresa que para evaluar el caudal requerido de agua para riego se debe tener presente:

Evapotranspiración Potencial del Cultivo (ET_o): se refiere a la proporción de agua que consume un sembrío, durante cierta etapa, en terreno recubierto de vegetación uniforme, poblada y en plena actividad vegetativa. Su unidad de medida es el mm/día. El proyecto que aquí se expone usa el método de Hargreaves.

$$ET_o = 0.0023 \times Ra \times (T_m + 17.8) \times \sqrt{TD} \quad (33)$$

Donde:

- ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)
 Ra : Radiación extraterrestre (mm/día)
 T_m : Temperatura media diaria en (°C)
 TD : Diferencia de temperatura máxima media y la mínima media (°C)

Factores de cultivo (K_c): Factor que señala nivel de desarrollo o cobertura del cultivo, su valor está supeditado a las estructuras anatómicas, morfológicas y fisiológicas de cada cultivo, representa la capacidad de un sembrío para extraer agua del suelo en las distintas etapas del periodo vegetativo. Parámetro adimensional.

Evapotranspiración real del cultivo (U_C): Viene a ser el consumo real de agua por los sembríos; su valor fluctúa en función al estado de desarrollo de las plantas. La unidad de este parámetro es mm/día.

$$UC = ET_o \times K_c \quad (34)$$

Precipitación efectiva (P_E): Indica la cantidad de agua que usa el sembrío, de toda la precipitación de lluvia registrada, a fin de satisfacer sus necesidades parcial o totalmente. Su unidad es el mm

Requerimiento de agua (Req): Conocido también como déficit de humedad, hace referencia a una capa extra de agua que se tiene que agregar al sembrío para cubrir sus requerimientos hídricos. Su unidad es mm/día.

$$Req = UC - PE \quad (35)$$

Eficiencia de riego (η_R): Es el parámetro de eficiencia del sistema de irrigación, indica que tan bien se están aprovechando el agua. Hay diversos valores según las modalidades de irrigación. Es un parámetro adimensional. En este proyecto se usó el riego gota a gota con un valor de 85% de eficiencia.

Requerimiento volumétrico neto del agua (RVN): En m³/Ha/día.

$$RVN = \frac{Req}{\eta_R} \times 10 \quad (36)$$

Área total de la parcela (A): Superficie total del terreno destinado al riego para el proyecto. Es posible calcularla mediante un balance hídrico entre

la oferta de agua del sistema de bombeo y la demanda de agua del cultivo. Se puede medir en Ha o m².

Caudal (Q): Para calcular el caudal requerido por el cultivo se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Demanda diaria de agua}}{\text{HSP}} \quad (37)$$

1.3.7.2. Cálculo de la altura total equivalente

Según Dávalos (2019), esta variable viene se calcula mediante la relación (38). Donde se suman las distancias desde el abatimiento del pozo hasta el tanque.

$$H_{TE} = H_i + H_f \quad (38)$$

Donde H_{TE} es la altura total equivalente, H_i es la altura total desde la bomba al reservorio y H_f altura por pérdidas de fricción (m). El diseño será de bombeo solar directo y no se considerará tanque de almacenamiento, luego, la altura H_i será el máximo nivel que alcance la tubería de impulsión. En cuanto a las pérdidas por fricción en las tuberías y en otros accesorios del sistema hidráulico, éstas serán menores al 10% de la energía hidráulica útil suministrada por la motobomba.

1.3.7.3. Cálculo de la potencia eléctrica de la bomba

Para determinar la potencia eléctrica que requiere la motobomba P_M se emplea la siguiente ecuación:

$$P_M = \frac{H_{TE} \cdot \gamma \cdot Q}{\eta} \quad (39)$$

Donde γ es el peso específico del agua, cuyo valor se considera 9.81 kN/m³, η es la eficiencia de la bomba.

1.3.7.4. Cálculo de la potencia del generador

Castejón y Santamaría (2010) El valor **mínimo de potencia del generador fotovoltaico** $P_{G-mín}$, se halla con la relación siguiente:

$$P_{G-mín} = \frac{E_T \cdot G_0}{G_{dm} \cdot R} \quad (40)$$

Donde:

P_{G-min}	: Potencia del generador	en	kW
E_T	: Consumo de energía diario	en	kWh
G_0	: Irradiación en condiciones estándar	en	kW/m ²
G_{dm}	: Valor medio mensual de irradiación	en	kWh/m ²
R	: Rendimiento global de la instalación	en	%

1.3.8. Evaluación económica

De acuerdo con Espinoza y Zaroni (2021), el análisis económico es un proceso metódico y organizado mediante el cual se realiza un análisis de variables vinculadas al flujo de dinero, lo cual concierne a todo proyecto de inversión. El objetivo de esta evaluación es principalmente el de estimar la capacidad de recuperación del capital invertido en el proyecto, así como la rentabilidad financiera que dicha inversión genere.

1.3.8.1. Valor Actual Neto (VAN)

El valor actual neto (VAN) es una herramienta financiera empleada para determinar la viabilidad económica de una inversión. El proceso consiste en medir los flujos de los futuros ingresos y egresos, luego restar el desembolso inicial y si quedara un saldo positivo, el proyecto es viable. El valor del VAN es la adición de los valores actualizados de todos los flujos de caja esperados del proyecto, deduciendo el valor de la inversión. Mide la viabilidad y se puede calcular por medio de la siguiente relación (ESAN, 2017):

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+r)^n} \quad (32)$$

Donde

Q_n	:	flujo de caja
I	:	desembolso inicial
n	:	Número de períodos
r	:	Interés

Valor significativo:

$VAN > 0$ La inversión producirá ganancia

$VAN < 0$ La inversión producirá Perdidas

VAN = 0 La inversión no producirá pérdidas ni ganancias

1.3.8.2. Tasa interna de retorno

Según Sevilla (2014) la tasa interna de retorno (TIR) es aquella rentabilidad que ofrece una inversión, esto es, es el porcentaje de ganancia o pérdida que finalmente tendrá una inversión para las cantidades que aún permanecen en proyecto.

Es un método empleado en el análisis y evaluación de proyectos de inversión y está estrechamente ligado con el **VAN**. Una definición alternativa presenta a este método como el valor de la tasa de descuento que hace que el VAN sea cero, para un proyecto de inversión dado.

La TIR indica una medida relativa de la rentabilidad, esto es, representa un porcentaje. Existen ciertos inconvenientes al momento de calcular su valor, ya que el número de periodos determinará el grado de la ecuación a la que se tiene que dar solución. Para salvar esta situación se pueden emplear ciertas estimaciones, emplear una calculadora financiera o un programa informático. También se define operacionalmente, la TIR es la tasa de descuento que iguala, en el momento inicial, la corriente futura de cobros con la de pagos, generando un VAN igual a cero:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + TIR)} + \frac{F_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (33)$$

F_t : son los **flujos de dinero** en cada periodo t

I_0 : es la inversión inicial

n : es el número de periodos de tiempo

El criterio de selección será el que detalla líneas abajo donde “ k ” es la tasa de descuento de flujos elegida para el cálculo del VAN:

- Si $TIR > k$, el proyecto será aceptado, puesto que TIR hallada es mayor a la tasa mínima de rentabilidad exigida que se le esta exigiendo a la inversión.
- Si $TIR = k$, estaríamos en una situación similar a la que se produciría si el VAN se iguala a cero. En este caso, la inversión podrá llevarse a

cabo si mejora la posición competitiva de la empresa y no hay alternativas más favorables.

- Si $TIR < k$, el proyecto no será aceptado, ya que no se alcanza la rentabilidad mínima que se le está exigiendo a la inversión.

1.3.8.3. Relación costo/beneficio

El parámetro beneficio / Costo (B/C) es un valor que se calcula mediante la división de los valores actualizados de Beneficios entre Costos, definiendo a beneficio como los ingresos y costos como egresos en el flujo de caja del proyecto de inversión; dicha actualización financiera se lleva a cabo a una tasa de rentabilidad prefijada y aceptada a la que se le conoce como Tasa de Evaluación. Los resultados se considerarán como aceptables para indicadores mayores a uno, y mientras mayor sea el valor de este cociente, mayor será la rentabilidad del proyecto (Espinoza y Zanoni, 2021).

1.3.8.4. Payback

De acuerdo con Abad y Flores (2016) el período de recuperación o PayBack estático, indica el periodo en el que se prevé que un proyecto devolverá la inversión que se ha dado, considerándose un indicador de riesgo, ya que, a mayor tiempo de recuperación de la inversión, se acrecentará la incertidumbre, y afectará a la rentabilidad del mismo.

1.4. Formulación del problema

¿Es factible técnica y económicamente emplear un sistema de bombeo solar fotovoltaico directo para suplir la demanda del recurso hídrico que requieren los cultivos de una parcela de 7 hectáreas en el distrito de Guadalupe, departamento de La Libertad?

1.5. Justificación e importancia del estudio

1.5.1. Justificación científica

Los sistemas fotovoltaicos en general vienen siendo ampliamente estudiados y la tecnología a día de hoy tiene un completo sustento científico.

La presente investigación se basa en toda la teoría referida a paneles solares y demás componentes de estos sistemas, teoría que posee rigor científico además de una amplia difusión a escala industrial. La consistencia de este proyecto de tesis se sostiene del método científico, contribuyendo con nuevos resultados en el medio local sobre la aplicación de bombeo solar en lugar de bombeo mediante motobomba a base de combustibles fósiles.

1.5.2. Justificación económica – social

La investigación contribuyó en conocer la problemática de los agricultores; estos abastecen de agua sus sembríos con sistemas a base de combustibles fósiles ya que la red de canales está alejada de su zona agrícola, y es así que se presenta como alternativa de solución sostenible, el bombeo solar directo para riego por goteo. Por otro lado, la implementación de bombeo solar permitiría un ahorro económico en el largo plazo.

1.5.3. Justificación práctica

La investigación permite una mayor difusión de las aplicaciones de la energía solar para bombeo y las ventajas que esta trae consigo ya que hay un gran desconocimiento por parte del sector agrícola sobre el funcionamiento de este tipo de sistemas, es así que con los resultados del presente estudio se conseguirá dar un panorama concreto al agricultor sobre sistemas fotovoltaicos para bombeo solar.

1.6. Hipótesis

El diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico directo para irrigación gota a gota es factible técnicamente en virtud a la elevada irradiancia del lugar y esto permite satisfacer la demanda del recurso hídrico para los sembríos, además es económicamente factible debido a que permite un ahorro en el largo plazo comparado con el uso de combustibles fósiles.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de bombeo solar directo para satisfacer demanda de riego gota a gota requerido por los sembríos de palto en 7 hectáreas en el distrito de Guadalupito – departamento de La Libertad, 2021.

1.7.2. Objetivos específicos

- Evaluar el recurso solar, esto es, radiación incidente y horas solar pico para el distrito de Guadalupito, Virú, La Libertad.
- Determinar la demanda de agua requerida por el terrero de cultivo según el tipo de planta que se pretende sembrar en las hectáreas correspondientes.
- Realizar el dimensionamiento del sistema de bombeo; caudal de diseño, selección de bomba y número de paneles solares requeridos.
- Realizar la evaluación económica para el sistema de bombeo.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Tipo y diseño de investigación

El proyecto que aquí se expone, presenta un enfoque cuantitativo, ya que existe hipótesis, se tienen variables como irradiación solar y demanda de agua, además la teoría permite relacionar las variables y estas son mensurables (cuantificables). Se emplea la data existente o mediciones para probar la hipótesis. A partir de la prueba de la hipótesis y los resultados este enfoque permite extraer conclusiones.

El proyecto es del tipo no experimental en virtud a que no existe manipulación o control de variables y aplicada, porque se basa en los fundamentos básicos de ciencias de la ingeniería para ser aplicados de modo directo en este problema de índole energético.

El diseño de la investigación es descriptivo, en vista de que la realidad investigada será rigurosamente caracterizada desde la evaluación del recurso solar presente en el distrito de Guadalupito hasta el análisis e interpretación de los resultados obtenidos a través de los cálculos respectivos.

2.2. Población y muestra

En este estudio la población y muestra son únicos y está conformado solamente por la demanda de agua para la irrigación de la siembra de palto en 07 hectáreas en el sector El Incaico distrito de Guadalupito, provincia de Virú - Departamento de la Libertad.

2.3. Variables, Operacionalización

2.3.1. Variables

Variable independiente

- Irradiación solar en el distrito de Guadalupito
- Demanda de recurso hídrico requerido por plantas de Palto

Variable dependiente

- Sistema de bombeo solar directo para riego gota a gota

2.3.2. Operacionalización

VARIABLES	DIMENSION	INDICADORES	INDICES	TECNICA DE RECOLECCION DE INFORMACION	INSTRUMENTO DE RECOLECCION DE INFORMACION	INSTRUMENTO DE MEDICION
VARIABLE INDEPENDIENTE						
Radiación solar	Irradiación	Radiación solar	$\frac{Wh}{m^2}$	Análisis de documentos	Hoja de recolección de datos	Plataforma digital PVGIS
Demanda del recurso hídrico requerido por los sembríos	Volumen de agua	Agua para uso agrícola	m^3	Entrevista y Análisis de documentos	Hoja de Entrevista Ficha de análisis de documentos	Cálculos matemáticos
	Flujo de agua	Gasto requerido	m^3/s	Entrevista y Análisis de documentos	Hoja de Entrevista Ficha de análisis de documentos	Cálculos matemáticos
VARIABLE DEPENDIENTE						
Sistema de bombeo fotovoltaico	Potencia del módulo	Dimensionamiento del módulo FV	W_p	Observación, Análisis de documentos	Guía de Observación y ficha de análisis de documentos	Cálculos matemáticos
	Capacidad de la bomba	Dimensionamiento de la bomba	HP	Observación, Análisis de documentos	Guía de Observación y ficha de análisis de documentos	Cálculos matemáticos
	Tiempo de operación	Programación del controlador	min	Observación, Análisis de documentos	Guía de Observación y ficha de análisis de documentos	Cálculos matemáticos

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

En la investigación se emplearon como técnicas, métodos e instrumentos de recolección de datos lo siguiente: guía de observación directa y ficha de análisis documental. Se utilizó plataformas virtuales para recoger data de mediciones de radiación solar, manguera de nivelación para determinar altura manométrica y fuentes de información virtuales para el análisis documental.

2.5. Procedimiento de análisis de datos

Para el diseño de sistemas fotovoltaicos necesitamos conocer la cantidad de energía solar que incide sobre determinada zona, es decir, la irradiación. Existen diversos medios para determinarla y en el desarrollo de esta aplicación empleamos la data ofrecida por la plataforma Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Posteriormente se utilizó el software de Microsoft Excel para el procesamiento de los datos y su ordenamiento en forma tabular. Los resultados se presentan en tablas.

2.6. Criterios éticos

Objetividad: se intenta describir la realidad tal y como se presenta sin que intervenga el sesgo del investigador ni la manipulación de datos, expresando así también el profesionalismo del investigador.

Originalidad: Todas las fuentes de información empleadas en el presente trabajo de investigación son citadas y mencionadas en el acápite de referencias.

Veracidad: La información que aquí se expone es tal cual se presenta en la realidad.

2.7. Criterios de rigor científico

Toda la investigación se basa en el método científico, así como en la teoría bien establecida sobre sistemas fotovoltaicos y el diseño de los mismos. La data que se presenta, fue extraída de plataformas de entidades reconocidas

a nivel internacional como la European Commission y NASA, lo cual asegura confiabilidad en la información recogida.

III. RESULTADOS

3.1. Cálculos

A continuación, se exponen los cálculos y resultados de la presente investigación, desde la caracterización del lugar donde se dará el sembrío del palto hasta el diseño final del sistema fotovoltaico y los costos asociados.

3.1.1. Ubicación y evaluación del recurso solar

Tabla 4. *Ubicación y condiciones climatológicas en lugar del proyecto*

Ubicación y Condiciones climatológicas	
Departamento	La Libertad
Provincia	Virú
Distrito	Guadalupito
Anexo	El Incaico
Coordenadas geográficas	- 8.941941° (Latitud), - 78.61186° (Altitud)
Temperatura mínima media	17.54 °C
Temperatura media	20.81 °C
Temperatura máxima media	24.56 °C
Días nublado por semana	2

Fuente: elaboración propia

La tabla 4 pone de manifiesto que la latitud del lugar del proyecto es -8.941941° , luego con ello podemos saber el ángulo de inclinación de los paneles solares, empleando la tabla 1, tenemos que $\beta = 15^\circ$ con una orientación hacia el norte debido a nuestra posición en el hemisferio sur. Por otro lado, De acuerdo con la Gerencia Regional de Agricultura de la Libertad, en el distrito de Guadalupito se tiene una temperatura media de 20.81°C con un máximo de 24.56°C en épocas de verano donde existe la mayor irradiación solar. Además, la frecuencia de días nublados por semana según Data Access Viewer – NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources es de 2.

Para el diseño de sistemas fotovoltaicos necesitamos conocer la cantidad de energía solar que incide sobre determinada zona, es decir, la irradiación. Existen diversos medios para determinarla y en el desarrollo de esta aplicación empleamos la data ofrecida por la plataforma Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).

Tabla 5. *Irradiación y horas solar pico en el distrito de Guadalupe a 15°*

Mes/Año	Irradiación (kWh/m ² /mes)						HSP
	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio	
<i>Ene</i>	189.29	192.00	195.77	184.00	198.49	191.91	6.40
<i>Feb</i>	167.71	189.21	175.05	180.91	171.57	176.89	5.90
<i>Mar</i>	200.90	210.38	191.10	194.85	202.14	199.87	6.66
<i>Abr</i>	197.29	194.31	197.75	188.48	199.17	195.40	6.51
<i>May</i>	180.40	188.36	172.33	142.11	163.27	169.29	5.64
<i>Jun</i>	140.03	157.45	137.71	133.03	140.36	141.72	4.72
<i>Jul</i>	127.42	154.14	140.40	152.64	148.47	144.61	4.82
<i>Ago</i>	127.77	149.95	153.79	170.45	148.09	150.01	5.00
<i>Set</i>	170.68	99.93	176.69	184.53	185.75	163.52	5.45
<i>Oct</i>	180.58	182.35	184.83	186.19	180.92	182.97	6.10
<i>Nov</i>	183.36	184.42	159.75	168.78	171.67	173.60	5.79
<i>Dic</i>	180.10	182.24	194.08	181.07	165.41	180.58	6.02

Fuente: PVGIS (2020)

La tabla 5 muestra las horas de sol promedio diario por mes para superficies inclinadas 15° en el distrito de Guadalupe siendo el mes de marzo el mes con mayor irradiación y horas de sol por año con 6.66 HSP y el peor mes es junio con 4.72 HSP, la media anual de horas solar pico se calcula en 5.75 HSP. La irradiancia, que es la energía solar incidente se obtuvo de un promedio de 5 años, empleando data satelital de la plataforma PVGIS.

3.1.2. Determinación de la demanda energética

Demanda de agua

El diseño de la instalación de bombeo solar será para una demanda de riego por gota a gota. Esta modalidad de riego consiste en un conjunto de tuberías que mantiene el agua en la zona radicular de la planta bajo las condiciones de utilización más favorables al sembrío, suministrando la cantidad de agua requerida gota a gota. El agua se transporta gracias a conductos cerrados desde el punto de toma hasta el mismo sembrío, al que se aplica por medio de dispositivos denominados goteros o emisores. Para la cuantificación de la cantidad de agua que se ha de bombear, se necesita tener en consideración los siguientes datos preliminares:

- Área de terreno de cultivo : 7 ha = 70 000 m²
- Tipo de sembrío : Palta
- Frecuencia de riego : 2-4 veces/semana

El requerimiento de recurso hídrico de un sembrío, hace alusión a la cantidad de agua que se requiere para evitar deshidratación por pérdida mediante evaporación y transpiración (evapotranspiración). Es así que podemos establecer como la necesidad de irrigación a la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva.

Cada tipo de sembrío tiene diferentes demandas de agua diaria, la planta en consideración según el cliente es el Palto. El riego gota a gota es ampliamente usado en la implantación y durante la vida del sembrío debido a las ventajas que ofrece durante el año inicial de la siembra, como: reducido

consumo de agua, menor consumo de energía eléctrica, fácil control de malezas, mayor eficiencia en la fertilización, y por los buenos resultados que muestran experiencias en este tipo de sistemas.

El Palto, en un marco de plantación de 6.0 m x 4.0 m y una lámina de riego en máxima demanda de 3.90 mm/día o una dosis de riego de 93.58 l/planta/día. Por otro lado, la UNALM nos brinda la siguiente data respecto del requerimiento de agua en paltos.

Tabla 6. *Estimación de volúmenes de agua a aplicar en paltos maduros*

Meses	Eto mm/día	Kc	Etc mm/día	DB l/m ² /día	6 x 4 l/planta/día	6 x 6 l/planta/día
Enero	5,7	0,75	4,3	5,0	120,7	181,1
Febrero	5,9	0,75	4,4	5,2	124,9	187,4
Marzo	4,6	0,75	3,5	4,1	97,4	146,1
Abril	3,3	0,75	2,5	2,9	69,9	104,8
Mayo	2,1	0,75	1,6	1,9	44,5	66,7
Junio	1,1	0,65	0,7	0,8	20,2	30,3
Julio	0,8	0,65	0,5	0,6	14,7	22,0
Agosto	1,1	0,65	0,7	0,8	20,2	30,3
Septiembre	2,1	0,65	1,4	1,6	38,5	57,8
Octubre	3,3	0,65	2,1	2,5	60,6	90,8
Noviembre	4,6	0,75	4,1	4,1	97,4	146,1
Diciembre	5,5	0,75	4,9	4,9	116,5	174,7

Etc = Evapotranspiración del cultivo = Eto x Kc;
 Kc = Coeficiente de cultivo;
 DB Demanda bruta = Etc/efa;
 Efa = eficiencia de aplicación (goteo = 0.9; Microaspersión = 0.85).

Para calcular el caudal requerido por el cultivo se emplea la siguiente ecuación:

$$Caudal = \frac{\text{Demanda diaria de agua}}{HSP} \quad (2)$$

Con esto se obtienen los siguientes caudales requeridos por mes

Tabla 7. Demanda de agua por mes de acuerdo a demanda unitaria

Mes/Año	HSP	Demanda unitaria (l/m ² /día)	Caudal requerido – 7 ha (l/min)
<i>Enero</i>	6.40	5.0	912
<i>Febrero</i>	5.90	5.2	1029
<i>Marzo</i>	6.66	4.1	718
<i>Abril</i>	6.51	2.9	519
<i>Mayo</i>	5.64	1.9	393
<i>Junio</i>	4.72	0.8	198
<i>Julio</i>	4.82	0.6	145
<i>Agosto</i>	5.00	0.8	187
<i>Setiembre</i>	5.45	1.6	342
<i>Octubre</i>	6.10	2.5	478
<i>Noviembre</i>	5.79	4.1	827
<i>Diciembre</i>	6.02	4.9	950
Promedio			558

Fuente: elaboración propia

Para las 7 ha, el rango de caudales requerido por año es de 145 a 1029 l/min con una media de 558 l/min; sin embargo, el diseño se realiza para el mes con mayor demanda de agua, esto es 1029 l/min con 5.90 de HSP.

Altura total equivalente

La altura total equivalente se calcula mediante la relación que se muestra a continuación. Donde se suman las distancias desde el abatimiento del pozo hasta el tanque elevado.

$$H_{TE} = H_i + H_f$$

El diseño será de bombeo solar directo y no se contempla reservorio, luego, la altura H_i será el máximo nivel que alcance la tubería de impulsión.

En la parcela de cultivo (lugar del proyecto) se cuenta con un pozo de 1,00 m de diámetro y 18 m de profundidad. La bomba sumergible estará a aproximadamente 10 m de la cota del terreno inmediato al pozo, luego el terreno presenta una máxima elevación de 6 m y en cuanto a las pérdidas por fricción en las tuberías y en otros accesorios del sistema hidráulico, éstas serán inferiores al 10% de la energía hidráulica útil proporcionada por la motobomba. Entonces:

$$H_{TE} = 10 + 6 + 0.1 \cdot (10 + 6)$$

$$H_{TE} = 17.6 \text{ m}$$

3.1.3. Dimensionamiento de sistema de bombeo solar

Cálculo de la potencia eléctrica de la bomba

Para cuantificar la potencia eléctrica que requiere la motobomba P_M se emplea la siguiente ecuación:

$$P_M = \frac{H_{TE} \cdot \gamma \cdot Q}{\eta}$$

Donde γ es el peso específico del agua, cuyo valor se considera 9.81 kN/m³, η es la eficiencia de la bomba para la cual, de acuerdo a las especificaciones técnicas, un valor adecuado sería 0.60 y el caudal se toma igual a 1029 l/min = 0.01715 m³/s. Así, obtenemos:

$$P_M = 5.6 \text{ kW}$$

Cálculo de la potencia del generador

Calculemos el consumo diario. Se sabe que la demanda diaria de agua para el mes con mayor consumo es

$$5.20 \frac{\text{l}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \cdot 70000 \text{ m}^2 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 364 \text{ m}^3/\text{día}$$

Luego, la energía de consumo de la bomba sería:

$$W_d = \frac{364 \cdot 9.81 \cdot 17.6}{0.60} = 104745 \text{ kJ} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} = 29.1 \text{ kWh}$$

El valor medio mensual de irradiación lo obtenemos para el mes de febrero a partir de la tabla 2 como sigue:

$$G_{dm} = \frac{176.89 \text{ kWh/m}^2}{30} = 5.89 \text{ kWh/m}^2$$

Para sistemas que solo tienen inversor/controlador, se recomienda un valor de PR = 0.7. En consecuencia:

$$P_{G-\text{min}} = \frac{29.1 \text{ kWh} \cdot 1.000 \text{ kW/m}^2}{5.89 \text{ kWh/m}^2 \cdot 0.7} = 7.01 \text{ kW}$$

Añadimos un factor de seguridad fs = 1.1 y finalmente obtenemos la potencia nominal del sistema P_G.

$$P_G = 7.7 \text{ kW}$$

El voltaje del sistema podría establecerse en 300 V; sin embargo, como veremos, un controlador adecuado requiere un voltaje de 540 VDC.

Según potencia de generación, altura máxima y caudal se buscaron diversas alternativas de varias fichas técnicas de los proveedores, optando por la electrobomba sumergida modelo Pedrollo 6SR 225G/150 CA, voltaje nominal trifásico de 380 V, la cual presenta las características de diseño.

Tabla 8. Ficha técnica de bomba seleccionada

6SR225G				Q	H metros						
MODELO	N. ETAPAS	POTENCIA (P ₂)			m ³ /h	0	12	24	36	48	60
Trifásica		kW	HP	l/min	0	200	400	600	800	1000	1200
6SR 225G/75	2	5.5	7.5		33	31	29	26	23	18	10
6SR 225G/100	3	7.5	10		50	47	43	39	34.5	27.5	15
6SR 225G/150	5	11	15		84	79	72	65.5	57.5	46	25
6SR 225G/200	7	15	20		117	110	101	91.5	80.5	64.5	35
6SR 225G/250	9	18.5	25		151	142	130	118	104	83	46
6SR 225G/300	10	22	30		167	157	144	131	115.5	92	51
6SR 225G/400	14	30	40		235	220	202	183.5	161.5	129	71

Q = Caudal H = Altura manométrica total

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grado 3B.

La electrobomba seleccionada tiene una potencia de 7.5 kW, con un caudal máximo de 1200 l/min y altura de bombeo de hasta 27.5 m. En la figura 4 se muestran las curvas características de la electrobomba y su respectiva señalización de acuerdo a su potencia, llegando a la conclusión que con 7.5 kW de potencia se puede bombear 1000 l/s, siendo este un flujo volumétrico muy próximo al caudal de diseño requerido de 1029 l/s.

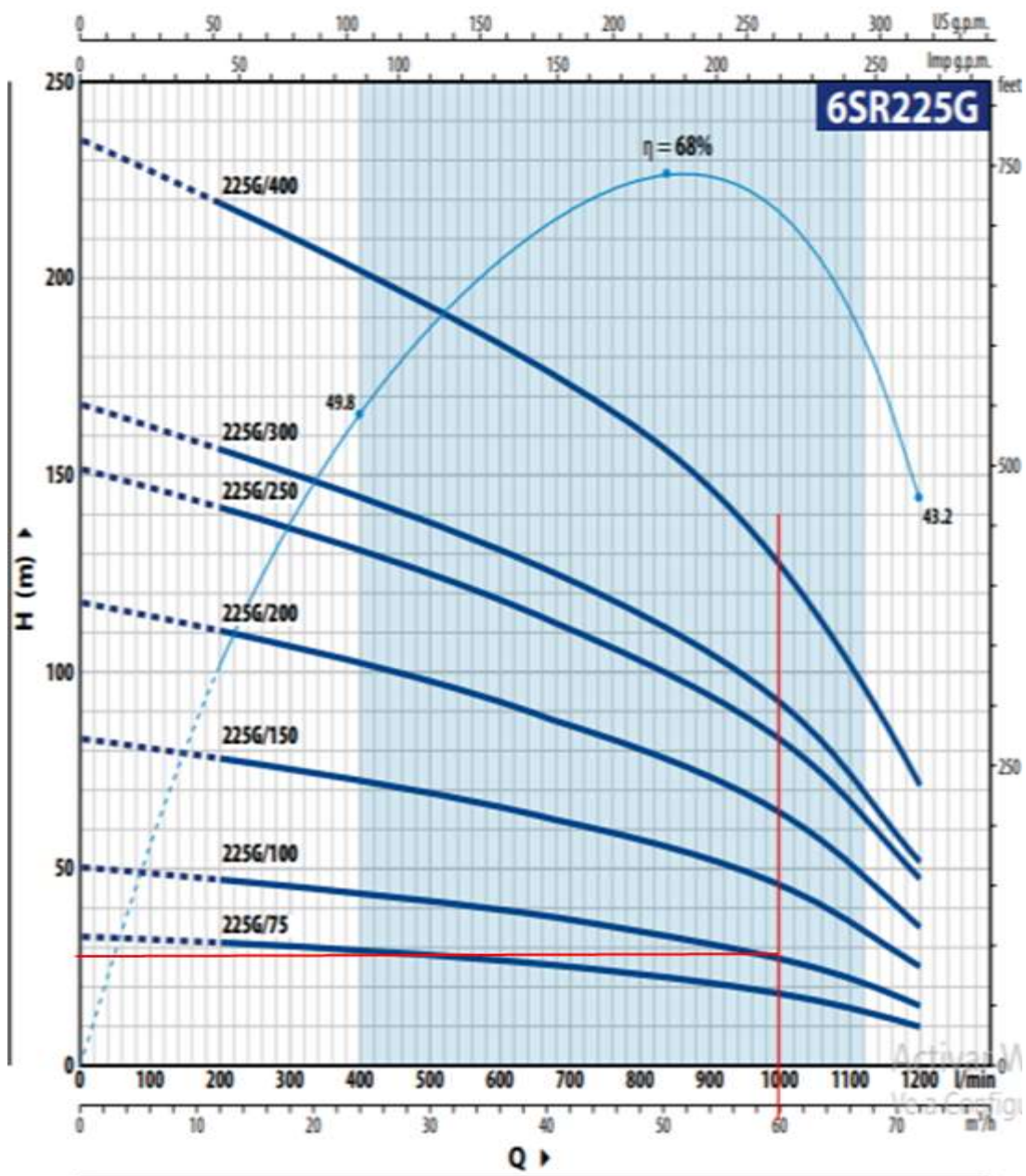


Figura 22. Curva característica de bomba sumergible Pedrollo 6SR 225G/150

Cálculo del número de paneles

Para continuar con el cálculo de los módulos fotovoltaicos, necesitamos de la ficha técnica del panel a emplear, para la presente aplicación se emplea el Panel Solar 370W 24V Monocristalino Bauer el cual presenta las siguientes especificaciones:

Tabla 9. Resultados obtenidos de selección de panel solar

Panel Solar 370 W Bauer Energy Monocristalino	
Potencia máxima, $P_{m\acute{a}x}$	370 W
Voltaje nominal, V_{nom}	24 V
Voltaje de máxima potencia, V_{mpp}	40.1 V
Corriente de máxima potencia, I_{mpp}	9.23 A
Voltaje de circuito abierto, V_{oc}	48.3 V
Corriente de corto circuito, I_{sc}	9.95 A
TNOCT	45 °C
Coefficiente de Temperatura CT_{mpp}	-0.57402 %
Coefficiente de Temperatura CT_{Voc}	-0.38038 %
Coefficiente de Temperatura CT_{Isc}	0.02973 %

Fuente: elaboración propia

El efecto que tiene la temperatura sobre un panel solar es muy importante y debe considerarse en los cálculos ya que, sucede que, al aumentar la temperatura ambiente, menor será la potencia de salida del módulo fotovoltaico.

Reemplazando en las ecuaciones respectivas, obtenemos

Tabla 10. *Magnitudes corregidas*

Temperatura de la celda		
T_c	55.81	°C
Variación en las magnitudes		
ΔP_{máx}	-17.69	%
ΔV_{oc}	3.19	%
ΔI_{sc}	0.9	%
Magnitudes corregidas		
P_{máx, corr}	304.56	W
V_{oc, corr}	49.84	V
I_{sc, corr}	10.0	A

Fuente: elaboración propia

Pasamos a calcular el número de paneles fotovoltaicos y su disposición (serie – paralelo)

Cantidad de paneles solares N

$$N = \frac{P_{G-FV}}{P_{máx,corr}}$$

$$N = \frac{7500 \text{ W}}{304.56} = 24.8 \approx 25 \text{ paneles}$$

$$N_{serie} = \frac{V_{nom-sist}}{V_{mpp}}$$

$$N_{serie} = \frac{540}{40.1} = 13.5 \approx 14 \text{ paneles – serie}$$

$$N_{paralelo} = \frac{P_{G-FV}}{P_{máx,corr} \cdot N_{serie}}$$

$$N_{paralelo} = \frac{7500}{304.56 \cdot 14} = 1.76 \approx 2 \text{ strings – paralelo}$$

Finalmente

$$V_{mpp-G} = N_{serie} \cdot V_{mpp} = 14 \cdot 40.1 = 561.4 \text{ V}$$

$$V_{oc-serie} = N_{serie} \cdot V_{oc} = 14 \cdot 49.84 = 697.8 \text{ V}$$

$$I_{mpp-G} = N_{paralelo} \cdot I_{mpp} = 2 \cdot 9.60 = 19.2 \text{ A}$$

$$I_{sc-paralelo} = N_{paralelo} \cdot I_{sc} = 2 \cdot 10.00 = 20.0 \text{ A}$$

$$P_{G-FV} = N \cdot P_{m\acute{a}x, corr} = 28 \cdot 304.56 = 8.5 \text{ kW}$$

Cálculo del controlador

Se requiere un controlador para bombas sumergibles de 380 V con una potencia de 7.5 kW, en el mercado se encontró el **Controlador Quadro 400 V 11 kW**, este controlador tiene una entrada 540 VDC, una salida 3x380/400/415/440 VAC y corriente de controlador de 22 A, así como un rango de potencia de 7.5 kW hasta 11 kW.

Para hallar la corriente del regulador I_{cont} , primero se calcula el producto de la corriente máxima del generador fotovoltaico, esto es, $I_{sc-paralelo}$, por un factor de seguridad fse para luego seleccionado un regulador comercial según la relación:

$$I_{cont} > I_{sc-paralelo} \cdot fse$$

Calculamos

$$I_{sc-paralelo} \cdot fse = 20 \cdot 1.1 = 22 \text{ A}$$

Luego, se selecciona el **Controlador Quadro 400 V 10 – 15 HP**

Cálculo de cables

A continuación, calculamos las secciones de los cables que van del generador fotovoltaico al controlador (S_{G-C}) y del controlador a la bomba hidráulica (S_{C-B}).

$$S_{G-C} = \frac{2 \cdot 0.022 \cdot 40 \cdot 19.2}{5\% \cdot 540} = 1.30 \text{ mm}^2$$

Esto corresponde a un cable AWG de sección nominal de 1.5 mm², pero se selecciona un calibre mayor ya que el cálculo fue exacto. Luego $S_{G-C} = 2.5 \text{ mm}^2$.

$$S_{C-B} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0.022 \cdot 35 \cdot 22 \cdot 0.85}{5\% \cdot 380} = 1.31 \text{ mm}^2$$

Esto corresponde a un cable AWG de sección nominal de 1.5 mm², pero se selecciona un calibre mayor ya que el cálculo fue exacto. Luego S_{C-B} = 3x2.5 mm².

3.1.4. Evaluación económica

Costo de componentes

Tabla 11. Costo de componentes de sistema de bombeo solar

Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario S/.	Parcial S/.
1	Costos de los componentes			40351.23
1.1	Panel Fotovoltaico	28	868.61	24321.08
1.2	Regulador	1	4247.15	4247.15
1.3	Electrobomba Sumergible	1	11783.00	11783.00
2	Costos Complementarios			18485.07
2.1	Termomagnetico DC 2P 10A 550DC	2	70.65	141.30
2.2	Termomagnetico DC 2P 20A 550DC	1	70.65	70.65
2.3	Caja Combinadora	1	240.00	240.00
2.4	Cableados	2	250.00	500.00
2.5	Conectores y otros	1	150.00	150.00
2.6	Estructura de fierro Galvanizado	28	531.54	14883.12
2.7	Sistema de Puesta a Tierra	1	2500.00	2500.00
3	COSTO TOTAL			S/.58,836.30

Fuente: elaboración propia

Payback

Gasto mensual actual en combustible	:	~ S/. 400
Gasto anual actual en combustible	:	~ S/. 5000
Tiempo de vida útil de paneles solares	:	25 años

$$\text{Payback} = \frac{\text{Importe total de la inversión}}{\text{flujo anual}}$$

$$\text{Payback} = \frac{58836.44}{5000}$$

Payback = 11 años

El retorno de la inversión se daría al cabo de 11 años, pudiendo ser este valor menor ya que no se consideró los gastos en mantenimiento, siendo mayores en el caso de una motobomba a base de combustibles fósiles. Entonces el retorno de la inversión se estima en 10 años.

3.2. Presentación de los resultados

En la tabla 12, muestra el resultado del diseño propuesto de la bomba sumergible modelo **Pedrollo 6SR 225G/150 trifásica**.

Tabla 12. *Especificaciones de la bomba sumergible calculada*

Modelo de bomba	Caudal	Altura	Potencia	Voltaje
	requerido	total	nominal	nominal
	(l/min)	(m)	(kW)	(V)
Bomba sumergible modelo Pedrollo 6SR 225G/150.	1000	27.5	7.5	380

Fuente: elaboración propia

La electrobomba seleccionada tiene una potencia de 7.5 kW, con un caudal máximo de 1200 l/min y una altura 27.5 m. En líneas anteriores se presentaron las curvas características de la electrobomba y su respectiva señalización de acuerdo a su potencia, obteniendo como resultado que con 7.5 kW de potencia se puede bombear 1000 l/min, flujo que es muy cercano

al caudal de diseño requerido de 1029 l/min. Por otro lado, debido al gran flujo volumétrico que se tiene, esta es una bomba trifásica 380 V.

Se presentan los resultados obtenidos para el sistema fotovoltaico.

Tabla 13. Componentes de Sistema fotovoltaico

Parámetro	Capacidad	
Potencia instalada	P_G	10.36 kW
Potencia de generación del sistema	P_{G-FV}	8.5 kW
Voltaje del sistema fotovoltaico	V	540 V
Número de paneles	N	28 u
Número de paneles en serie	N_{serie}	14 u
Número de paneles en paralelo (strings)	$N_{paralelo}$	2 u
Potencia de bomba sumergible	P_B	7.5 kW
Caudal de operación	Q	1000 l/min
Altura total equivalente	H_{TE}	27.5 m
Controlador	P	11 kW
Rango de potencia	P	7.5 - 11 kW
Tensión de entrada	V_{cont}	540 VDC
Corriente de salida	I_{cont}	22 A
Sección de cable		
Generador – Controlador	S_{G-C}	2.5 mm ²
Controlador – Bomba	S_{C-B}	2.5 mm ²
Evaluación económica		
Costo de componentes		58,836 S/.
Retorno de la inversión		10 años

Fuente: elaboración propia

Los paneles solares empleados para la presente aplicación son los **370W 24V Monocristalino Bauer** en una cantidad de 28 módulos en un ángulo de inclinación de 15° como se ha descrito con anterioridad.

Tabla 14. Resultados obtenidos de selección de panel solar

Panel Solar 370 W Bauer Energy Monocristalino	
Potencia máxima, $P_{m\acute{a}x}$	370 W
Voltaje nominal, V_{nom}	24 V
Voltaje de máxima potencia, V_{mpp}	40.1 V
Corriente de máxima potencia, I_{mpp}	9.23 A
Voltaje de circuito abierto, V_{oc}	48.3 V
Corriente de corto circuito, I_{sc}	9.95 A
TNOCT	45 °C
Coeficiente de Temperatura CT_{mpp}	-0.57402 %
Coeficiente de Temperatura CT_{Voc}	-0.38038 %
Coeficiente de Temperatura CT_{Isc}	0.02973 %

Fuente: elaboración propia

Se requiere un controlador para bombas sumergibles de 380 V con una potencia de 7.5 kW, en el mercado se encontró el **Controlador Quadro 400 V 11 kW**, este controlador tiene una entrada 540 VDC, una salida 3x380/400/415/440 VAC y corriente de controlador de 22 A.

Tabla 15. Resultados de regulador/inversor

Regulador Quadro 400 V 11 kW	
Rango de potencia de salida	10 - 15 HP
	7.5 - 11 kW
Voltaje PV de entrada	540 VDC
Máximo voltaje PV de entrada	800 VDC
Voltaje de salida	3 x 380/400/415/440 VAC
Corriente de salida	22 A

Fuente: elaboración propia

3.3. Discusión

Este trabajo de investigación tiene como lugar de aplicación en el anexo denominado Incaico, del distrito de Guadalupito, provincia de Virú y departamento de La Libertad. En la localidad, existen cerca de 1800 hectáreas de las cuales la mayoría se abastece mediante dos canales de regadío; sin embargo, existe un aproximado de 100 ha a las cuales la red de canales no llega, es por ello que la totalidad de estas requieren de motobombas a base de combustibles fósiles para poder satisfacer los requerimientos de agua de sus sembríos y los sistemas de riego por goteo ya están instalados en todas las parcelas, es así que esta investigación y las que se realicen en este sector no necesitan realizar el dimensionamiento del sistema de irrigación gota a gota sino solo el sistema de bombeo. En la presente investigación se ha calculado una electrobomba sumergible de 7.5 kW para las 7 hectáreas del propietario; sin embargo al estar todas las parcelas aledañas, se podría realizar un dimensionamiento a gran escala para satisfacer la demanda de todas las parcelas y dividir las inversión inicial entre todos los propietarios, esto resultaría ventajoso debido a que muchos de los sembríos se riegan con frecuencias de 2 a 4 veces por semana en intervalos de 2 a 3 h, quedando otros días y horarios para realizar turnos de riego y así trabajar en conjunto y aprovechar la energía solar. Las observaciones del lugar objeto de estudio permiten proyectar la posibilidad de un parque solar para las 100 has que se riega empleando una motobomba; sin embargo, existe un gran desconocimiento por los agricultores sobre si realmente los sistemas solares de bombeo funcionan, esto debe inculcar en los investigadores charlas orientativas o sistemas piloto con fines ilustrativos y de estudio.

No existen antecedentes de investigaciones en el distrito de Guadalupito sobre sistemas fotovoltaicos; sin embargo, a nivel de macrolocalización, es decir, en el departamento de La Libertad, uno de los antecedentes refiere a la provincia de Chepén un rango de irradiancia de 4.74 kWh/m²-día – 6.26 kWh/m²-día (Talavera, 2019), además según el Mapa de Radiación Solar de La Libertad elaborado por SENAMHI, la zona de la localidad de Guadalupito

posee una radiación que varía de 4.5 a 6.5 kWh/m²-día. Los datos mencionados concuerdan con gran precisión con la irradiación que refiere la plataforma digital PVGIS de la European Comission la cual da un rango de 4.72 – 6.66 kWh/m²-día. Notamos un mínimo estimado de 4.5 kWh/m²-día para Guadalupito, valor relativamente alto para diseño de sistemas fotovoltaicos en dicha localidad que requiere sobre todo de sistemas de bombeo. Por otro lado, es necesario comentar que sería conveniente realizar campañas de medición de irradiación solar en el emplazamiento objeto de estudio a fin de corroborar u obtener una data más precisa para un potencial parque solar de mayor capacidad que sea capaz de suministrar agua a las 100 has en su conjunto.

Respecto del diseño del sistema de bombeo, se considera directo debido a que no existe dispositivo de acumulación de energía como las baterías o un tanque de almacenamiento, esto debido a que con alguno de estos componentes se incrementaría el costo del sistema y no se considera necesario ya que los días nublados por semana se establecen en un máximo de 2 y las horas solar pico son mayores a 4, estas características son más que suficientes para riego por goteo con frecuencia de 2 a 4 veces por semana en intervalos de máximo 4 horas según expresa el propietario. Cabe comentar que el propietario podría proyectar un tanque de almacenamiento y con este, durante los días con horas de solar y en los que no riega, prestar servicio con precios aceptables a los vecinos para justificar y recuperar la inversión en el tanque, así como obtener potenciales ganancias.

De acuerdo con González y Lanuza (2018), el diseño del sistema de bombeo solar directo para irrigación gota a gota inició con la determinación de la demanda de flujo para una manzana de cultivo de tomate en el caso de los mencionados autores, luego se diseñó el sistema solar fotovoltaico y se seleccionó la bomba mediante cálculos y curvas de eficiencias para finalmente realizar el análisis financiero de la propuesta para poder determinar la factibilidad de la propuesta. En concordancia con esta investigación se demostró también a través del análisis financiero y con los cálculos de Valor

Actual Neto y Tasa Interna de Rentabilidad, que es rentable invertir en esta propuesta. Diversos autores señalan, acorde a la investigación, que, es rentable y sostenible la instalación de sistemas fotovoltaicos de bombeo, así lo expone Asmat (2018), afirmando que, la energía fotovoltaica representaría una alternativa rentable, debido a que es renovable, inagotable y limpia para lugares con poca accesibilidad y falta de suministro eléctrico, además de que a día de hoy los precios de los módulos fotovoltaicos están cayendo considerablemente, dando lugar a su adquisición y uso. La energía solar fotovoltaica aplicada a casos de bombeo resulta rentable en el mediano plazo, pero la inversión inicial sí es elevada y lo es aún más cuando se requiere de mayor confiabilidad para lo cual se emplearían baterías o depósito de acumulación de agua de grandes dimensiones.

A diferencia del estudio de Cajusol (2019) en el cual se realiza el aprovechamiento conjunto de recurso solar y eólico para diseñar un sistema híbrido solar eólico para bombeo de agua en Chiclayo – Lambayeque; en la zona de aplicación del proyecto no existe potencial eólico considerable, esto quedó evidenciado en las visitas realizadas a los sembríos, ya que se pudo observar una antigua instalación de una aerobomba y el agricultor propietario manifiesta que si bien, la aerobomba llegó a operar, no abastecía de suficiente agua además de tener muy poco tiempo de operación durante el día, razón por la cual se abandonó esta iniciativa y se optó por una motobomba convencional que quema combustibles fósiles. Y ahora se presenta la alternativa de bombeo solar debido al alto potencial solar en el distrito de Guadalupe. Se debe resaltar que se descarta el aprovechamiento de energía eólica por el antecedente descrito anteriormente, esto es solo en el lugar específico de esa parcela; sin embargo, en parcelas donde hay suficiente velocidad de viento, la energía eólica es un complemento adecuado para la generación fotovoltaica.

A diferencia de la investigación de Tsuchiya (2020) en el que manifiesta que los sistemas fotovoltaicos de Tanzania no se están utilizando satisfactoriamente. Además, con base en el simple análisis del retorno de la

inversión, el retorno del capital invertido para tales proyectos ha sido negativo, en nuestro país se muestran muchas aplicaciones que están siendo llevadas a cabo con éxito, de igual manera la investigación que aquí se presenta posee una retorno de la inversión favorable así como un payback calculado en 10 años, considerando que el tiempo de vida útil de una instalación fotovoltaica es de 25 años, el retorno de la inversión se da en el mediano plazo y además se contribuye con la disminución de los combustibles fósiles al emplear energías renovables como la solar. Podemos expresar, finalmente, que la mayoría de sistemas fotovoltaicas posee una vida útil de 25 años, de los cuales, con un payback de 10 años, se tienen prácticamente 15 años con energía gratuita, pero es necesario siempre realizar mantenimientos a los módulos y los demás componentes, pero el costo de ello es mínimo.

3.4. Aporte práctico

Este trabajo de investigación expresa un aporte fundamental para el objetivo principal de dar una alternativa de solución confiable a los agricultores que carecen de una fuente de recurso hídrico como un canal convencional, estos pueden extraer agua de pozos tubulares de diversas formas entre ellas, por ejemplo, la energía solar o eólica, pero por desconocimiento o falta de apoyo técnico optan por sistemas a base de combustibles fósiles. A partir de esta propuesta técnica, el panorama para el agricultor se amplía con resultados concretos y favorables ya que un sistema fotovoltaico de bombeo ofrece muchas ventajas respecto de una motobomba convencional como fácil y barato mantenimiento y mayor disponibilidad al no depender de la compra de combustibles.

De darse la implementación de este proyecto, el propietario tendrá un sistema confiable a su disposición para el bombeo de agua para sus sembríos, reducirá costos en el mediano plazo y tendrá a su disposición agua durante las horas de sol que se dan en el distrito de Guadalupe, además representaría el primer sistema de bombeo solar en la zona y esto podría incentivar a los demás agricultores a instalar estos sistemas al conocer de

manera directa esta tecnología y corroborar su funcionalidad y las ventajas y ofrece.

Cabe resaltar respecto de los sistemas de bombeo solar que no es un sistema agresivo ni invasivo con la naturaleza, al contrario, sus procesos se hacen de la manera más amigable con el ecosistema y su uso contrarresta la quema de combustibles fósiles en las motobombas convencionales.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Según la localidad donde se desarrolló el estudio, la irradiación fluctúa de 4.72 kWh/m²/día en junio hasta 6.66 kWh/m²/día en marzo para módulos inclinados 15°. El criterio que se aplica es para el mes con mayor demanda hídrica, es decir, el mes de febrero, el cual tiene una irradiación de 5.90 kWh/m²/día.
- Se estimó la demanda hídrica máxima durante el año en 1029 l/min lo que corresponde a una demanda energética de 29.1 kWh/día y potencia de bomba en 7.5 kW. Esta potencia es suficiente para cubrir la demanda del mes con menor radiación solar, es decir, el mes de julio ya que en dicho mes el requerimiento de riego no es muy elevado.
- El sistema fotovoltaico de bombeo de agua consta de un arreglo de 28 paneles de 370 Wp conectados 14 en serie y 2 strings en paralelo; 1 controlador de carga de 22 A y 540 VCD de entrada del sistema solar y salida 380/400/415/440 VAC; 1 electrobomba sumergible de carga dinámica total 27.5 m y caudal máximo 1000 l/min (El caudal puede llegar hasta 1200 l/min, pero la altura se reduce a 15 m).
- El proyecto tiene una inversión inicial de S/. 58 836.44 equivalente a 14 709.11 USD en componentes, el costo principal recae en los 28 paneles (S/.24 321.08), el regulador (S/.4247.15) y la bomba sumergible (S/. 11 783.14)
- Se realizó la evaluación económica del proyecto, se empleó el método del payback a fin de obtener resultados simples y concretos que pudieran ser compartidos con el agricultor propietario, este payback se calculó en 10 años, esto es, el retorno de la inversión se dará en el largo plazo, en dicho tiempo.

4.2. Recomendaciones

- Se sugiere la instalación del proyecto diseñado. A su vez se recomienda la implementación de este tipo de proyectos en las hectáreas aledañas en el anexo El Incaico del distrito de Guadalupe ya que el agua del canal no llega hasta estas zonas alejadas, además, la cantidad de terreno es elevada y la zona propicia para aprovechamientos fotovoltaicos debido a la radiación solar que aquí ya se ha expuesto.
- De darse la implementación del sistema de bombeo fotovoltaico propuesto, se recomienda un mantenimiento continuo de los módulos fotovoltaicos, por ejemplo, una frecuencia de una vez por mes sería ideal para evitar que se acumule suciedad en la superficie de los módulos y disminuya su eficiencia, lo que traería como consecuencia una menor producción de energía eléctrica y una reducción en el tiempo de vida útil de los módulos.

V. REFERENCIAS

- Abad, P. y Flores, E. (2017). Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo para reducir el consumo de combustible en la plataforma de descarga de la pesquera Exalmar -Chimbote Perú [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio institucional - Universidad Nacional del Santa.
- Administración local del agua Moche Chau Virú. (2010). Propuesta de actualización de asignación de agua en bloque en los valles Moche, Virú, Chao, Guadalupito e intervalles. Ministerio de Agricultura Autoridad Nacional del Agua, Dirección de administración de recursos hídricos.
- Alata, J. (2015). Dimensionamiento de un sistema de bombeo con paneles solares - caso UNALM [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional - Universidad Nacional de Ingeniería.
- Alonso, J. (2015). Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia y HSP. SunFields Distribuidor de material y equipos fotovoltaicos. Recuperado el día 28 de octubre de 2021 de https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/#Autor_Redactor
- Alvarado, J. (2018). Diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica aislada [Tesis de pre grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio institucional - Universidad Politécnica de Madrid.
- Arroyave, J. (2018). Factibilidad de la implementación de paneles solares fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en las cabeceras municipales de las zonas no interconectadas de Colombia [Tesis de pre

grado, Universidad EAFIT]. Repositorio institucional – Universidad EAFIT.

Asmat, C. (2018). Determinación de la eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico en el distrito de Yaurisque – Cusco. [Tesis de pre grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional - Universidad Nacional Agraria La Molina.

AutoSolar. (19 de abril de 2015). ¿Qué es un sistema de bombeo de agua solar? AutoSolar. Recuperado el día 29 de octubre de 2021 de <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-sistema-de-bombeo-de-agua-solar>

AutoSolar. (23 de junio de 2020). ¿Qué son las celdas solares? AutoSolar. Recuperado el día 29 de octubre de 2021 de <https://autosolar.es/blog/placas-fotovoltaicas/que-son-las-celdas-solares>

Banda, A. (2017). Estudio de viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico autónomo en las instalaciones de la UCSP [Tesis de pre grado, Universidad Católica San Pablo]. Repositorio institucional - Universidad Católica San Pablo.

Bautista, M. (07 de septiembre de 2013). Altura solar. Universitat Politècnica de València. Recuperado el día 28 de octubre de 2021 de <https://riunet.upv.es/handle/10251/30864>

Benghanem, M., Daffallah, K. y Almohammedj, A. (2018). Estimation of daily flow rate of photovoltaic water pumping systems using solar radiation data. Results in Physics, 8, 949 – 954. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.01.022>

- Cajusol, S. (2019). Dimensionamiento de un sistema híbrido eólico solar para el bombeo de agua en el fundo San Juan de Cayaltí provincia de Chiclayo-Lambayeque [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo]. Repositorio institucional - Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo.
- Castejón, A. y Santamaria, G. (2010). Instalaciones solares fotovoltaicas. EDITEX. <https://es.scribd.com/document/407834610/Castejon-Agustin-Y-Santamaria-German-Instalaciones-Solares-Fotovoltaicas-pdf>
- Chávez, D. (2018). Modelamiento, simulación y control comparativo de un panel solar con autoposicionamiento para la empresa Ayni SAC – Trujillo [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio institucional - Universidad Nacional de Trujillo.
- CINBO water pumps. (04 de julio de 2013). ¿Qué se debe hacer en una instalación sumergible? CINBO wáter pumps. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de <http://cinbo-cinbosa.blogspot.com/2013/07/como-instalar-tu-bomba-sumergible-paso.html>
- Córdoba, A. (15 de julio de 2020). Paneles solares ¿Cómo funciona un sistema de energía solar off grid? NOVUM SOLAR. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de <https://novumsolar.com/sistema-energia-solar-aislado-a-la-red-electrica/>
- Córdoba, A. (31 de mayo de 2020). ¿Qué es un Sistema solar Conectado a Red y cómo funciona? NOVUM SOLAR. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de <https://novumsolar.com/sistema-solar-conectado-a-red/>

- Dávalos, J. (2019). Diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el caserío la guayaba, distrito de bellavista, Jaén – Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio institucional - Universidad Nacional de Jaén.
- Diario el Peruano (14 de marzo de 2021). Electricidad con paneles solares para 48,000 viviendas rurales. El Peruano. Recuperado el día 13 de octubre de 2021 de <https://elperuano.pe/noticia/116948-electricidad-con-paneles-solares-para-48000-viviendas-rurales>
- ECyT-ar. (24 de noviembre de 2017). Irradiación solar. ECyT-ar. Recuperado el día 28 de octubre de 2021 de https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/index.php/Irradiaci%C3%B3n_solar
- El Bombero n°13. (20 de agosto de 2015). Los álabes en nuestras bombas. www.bombero13.com. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de <https://elbomberonumero13.wordpress.com/2015/08/20/los-alabes-en-nuestras-bombas/>
- Espinoza, J. y Zanoni, G. (2021). Diseño de sistema fotovoltaico off-grid, Red secundaria y conexiones Domiciliarias para suministro eléctrico al caserío Tallapampa, distrito salas, Provincia Lambayeque [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio institucional - Universidad Señor de Sipán.
- Farfán, J. y Campos, W. (2019). Energía solar fotovoltaica para la explotación de agua subterránea. UCV – HACER Revista de Investigación y Cultura, 8. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=521758809019>
- Fernández, L. y Cervantes, A. (2017). Proyecto de diseño e implementación de un sistema fotovoltaico de interconexión a la red eléctrica en la Universidad Tecnológica de Altamira [Tesis grado de maestría, Centro

de Investigaciones en Materiales Avanzados]. Repositorio institucional - Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados.

González, L. y Lanuza, A. (2018). Propuesta de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para riego por goteo en la finca Concepción comarca Ato viejo San Nicolás – Estelí, durante el periodo de julio a noviembre del 2017 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. Repositorio institucional - Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Heredia, C. y Sánchez, D. (2017). Diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico por goteo automatizado para terrenos de cultivo de espárragos del fundo Inca verde en el sector Pampas La Sandia provincia de Chepén - departamento de La Libertad [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio institucional - Universidad Señor de Sipán.

Hervias, A. (2018). Diseño de un sistema de bombeo mediante energía solar fotovoltaica para suministrar agua potable a la población de Maynas – Perú [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio institucional - Universidad Nacional del Callao.

Kamalvand, G. (2019). Evaluación técnica y económica de un sistema solar fotovoltaico para un complejo deportivo [Tesis de pre grado, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio institucional – Universidad Tecnológica del Perú.

Llopis, M. (2018). Diseño de una instalación solar fotovoltaica para bombeo de 55 kW para el riego de la huerta de Alicante de Mutxamel [Trabajo fin de Máster, Universitat Politècnica de Valencia y Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia]. Recuperado de: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/110369/23304203M_TFM

_15369108635281742701590251533015.pdf?sequence=1&isAllowed
=y

Markvart, T. y Castañer, L. (2013). Principles of Solar Cell Operation. Elsevier Ltd. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-386964-7.00001-9>

Messenger, R. y Abtahi, A. (2017). Photovoltaic Systems Engineering. CRC Press Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315151434>

Mu, T. y Weidemann (2010). Advanced LED Warning Signs for Rural Intersections Powered by Renewable Energy. Local road research board. Recuperado de <https://www.lrrb.org/pdf/201104.pdf>

Nuero, D. (16 de febrero de 2018). Curva característica de una bomba centrífuga. TECPA. Recuperado el día 28 de octubre de 2021 de: <https://www.tecpa.es/curva-caracteristica-de-una-bomba-hidraulica/>

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería OSINERGMIN (2019). Energías renovables Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. Lima, Perú. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf

Peralta, A. (2018). Estudio experimental de un sistema de bombeo solar fotovoltaico en corriente continua [Trabajo de investigación para grado de bachiller, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio institucional - Universidad Tecnológica del Perú.

Pérez, M., Morales, I. y Castro, E. (2017). The hour equivalent solar pick. Definition and interpretation. Ingeniería energética, 38. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012017000200007

- Pérez, S. (2019). Factibilidad técnica, económica y social de instalaciones eléctricas solar fotovoltaicas para el consumo doméstico de la localidad de “El vallecito”, Cusco [Tesis de pre grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional – Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Perpiñan, O. (2020). Energía Solar Fotovoltaica. Creative Commons. <https://github.com/oscarperpinan/esf>
- Planas, O. (08 de octubre de 2019). ¿Qué es un seguidor solar? ENERGÍA SOLAR Paneles de energía solar fotovoltaica. Recuperado el día 29 de octubre de 2021 de <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/seguidor-solar>
- Ponce, B. y Ramos, V. (2021). Mejora de la eficiencia de un sistema solar fotovoltaico autónomo aplicado a viviendas rurales de zonas aisladas del Perú 2020 [Tesis de pre grado, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio institucional – Universidad Tecnológica del Perú.
- Pontificia Universidad Católica del Perú (01 de marzo de 2017). El desarrollo de la energía solar en el Perú. GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL. Recuperado el día 13 de octubre de 2021 de <https://gruporural.pucp.edu.pe/nota/el-desarrollo-de-la-energia-solar-en-el-peru/>
- Prostar (20 de octubre de 2020). How to set solar panel angle to sun. Prostar. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de <https://www.prostarsolar.net/support/blog/how-to-set-solar-panel-angle-to-sun.html>
- Quintero, S. y Guinand, K. (2020). Protocolo y procedimiento aplicado a instrumentación piranómetro para medición de radiación solar [Tesis de

pregrado, Universidad de La Salle]. Repositorio institucional - Universidad de La Salle.

Reinders, A., Verlinden, P., van Sark, W. y Freundlich, A. (2017). Fotovoltaic Solar Energy From Fundamentals to Applications. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118927496>

Roca, J. (19 de diciembre de 2016). La energía solar ya es más barata que la eólica. El periódico de la energía. Recuperado el día 13 de octubre 2021 de <https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-solar-ya-es-mas-barata-que-la-eolica/>

Roca, J. (22 de julio de 2021). La energía solar, imparable: superará el teravatio instalado en 2022. El periódico de la energía. Recuperado el día 13 de octubre 2021 de <https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-solar-imparable-superara-el-teravatio-instalado-en-2022/>

Salinas, M. y Anguita, C. (2019). Sistema de bombeo solar para agricultura familiar campesina. Ministerio de agricultura del gobierno de Chile y Fundación para la Innovación Agraria. Recuperado de: https://www.opia.cl/601/w3-article-113438.html?_external_redirect=articles-113438_archivo_01.pdf

Santa Cruz, E. (24 de enero de 2017). Fundamentos financieros: el valor actual neto (VAN). Conexión ESAN. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/fundamentos-financieros-el-valor-actual-neto-van/>

Santa de Coro, J. (2014). Máquinas hidráulicas. Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda”. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de

<https://es.slideshare.net/eylinmachuca7/presentacin-bombas-centrifugas>

Santra, P. (2020). Performance evaluation of solar PV pumping system for providing irrigation through micro-irrigation techniques using surface water resources in hot arid region of India. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106554>

Sarrión, B. (09 de noviembre de 2018). Sistemas de almacenamiento termoquímico para energía solar concentrada. *ES ENERGÍA Portal de energía solar fotovoltaica y termosolar*. Recuperado el día 28 de octubre de 2021 de <https://esenergia.es/tesis-energia-solar-fotovoltaica/energia-solar-concentrada/>

Schilardi, C., Funes, D., Lunghi, Y., Longo, V., Méjica, A., Nogal, P. y Pedra R. (2019). Diseño de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para riego por goteo en viñedos. *II Congreso de agua, ambiente y energía*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/337495588>

Sevilla, A. (15 de julio de 2014). Tasa interna de retorno (TIR). *Economipedia.com*. Recuperado el día 01 de noviembre de 2021 de <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>

Singh D., Mahajan, A., Devli, D., Bharti, K., Kandari, S. y Mittal, G. (2021). A mini review on solar energy based pumping system for irrigation. *Materials Today: Proceedings*, 43, 417 – 425. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.716>

Sopelia (15 de marzo de 2020). Sistemas de seguimiento solar. *SOPELIA Solar Platform America Latina*. Recuperado el día 29 de octubre de 2021 de <https://www.energiasolar.lat/sistemas-de-seguimiento-solar/>

Sopelia (21 de julio de 2016). Rentabilidad fotovoltaica. SOPELIA Solar Platform America Latina. Recuperado el día 29 de octubre de 2021 de <https://www.energiasolar.lat/rentabilidad-fotovoltaica/>

SotySolar. (10 de septiembre de 2020). Seguidores solares: todo lo que necesitas saber. SotySolar. Recuperado el día 29 de octubre de 2021 de <https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>

Talavera, J. (2019). Factibilidad Técnico Económico Mediante la Implementación De Paneles Solares Fovovoltaicos Para Accionar Las Bombas De Riego Agrícola En El Distrito De Pacanguilla – Chepén – La Libertad [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional - Universidad César Vallejo.

Tsuchiya, Y., Swai, T. y Goto, F. (2020). Energy payback time analysis and return on investment of off-grid photovoltaic systems in rural areas of Tanzania. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 42, 1 – 7. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100887>

Turgeon, A y Morse, E. Solar energy. NATIONAL GEOGRAPHIC. Recuperado el día 15 de octubre de 2021. <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/solar-energy/>.

Universidad a distancia de Madrid. (02 de febrero de 2021). Seguidor solar: ¿qué es y para qué sirve? ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL BLOGD Udimá. Recuperado el día 29 de octubre de 2021 de <https://blogs.udima.es/ingenieria-industrial/seguidor-solar-que-es-y-para-que-sirve/>

Ventura, E. y Delgado, L. (2020). Diseño de un sistema fotovoltaico aislado para la demanda eléctrica de la posta médica, centro poblado Urakusa provincia Condorcanqui, Amazonas-Perú [Tesis de pregrado,

Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio institucional - Universidad Nacional de Jaén.

Zambrano, J. (2019). Sistema de bombeo de agua utilizando paneles solares en el sector Boyero – C.P. Porcón Alto [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional - Universidad Privada del Norte.

ANEXO



Figura A 1. Zona donde está la fuente del recurso hídrico y el pozo.



Figura A2. Terreno de cultivo

Tamaño del módulo	1956 x 992 x 45 mm
Células	72 piezas monocristalinas (156 x 156 mm)
Cristal	Bajo contenido en hierro y templado (3,2 mm)
Potencia máxima (Wp)	370W
Cable	90cm, 4mm ²
Voltaje en circuito abierto (Voc)	48.3V
Intensidad en cortocircuito (Isc)	9.95A
Voltaje a máxima potencia (Vm)	40.1V
Intensidad a máxima potencia (Im)	9.23A
Condiciones del test	1000W/m ² , 25°C, AM 1.5
Voltaje máximo sistema	1000Vdc
Coefficiente temperatura - Isc	+0.02973%
Coefficiente temperatura - Voc	-0.38038%
Coefficiente temperatura - Pmpp	-0.57402%
Temperatura normal trabajo célula	45°C
Eficiencia del módulo	19%
Certificados de producto	TUV(IEC 61215, IEC 61730), CE
Certificados de la empresa	ISO9001, ISO14001, ISO18001
Peso	21.5 kg
Garantía del producto	10 años
Garantía de potencia	25 años



Figura A3. Especificaciones técnicas de panel solar monocristalino Bauer Energy

MODEL	2.2 KW LS	2.2 KW	7.5 KW	11 KW
RATED OUTPUT POWER	2200 W(3HP) (supports 0.75-3HP water pump)	2200 W(3HP) (supports 0.75-3HP water pump)	7500 W(10HP) (supports 3-10HP water pump)	11000 W(15HP) (supports 10-15HP water pump)
PV INPUT (DC)				
Nominal DC Voltage / Maximum DC Voltage	320 VDC / 450 VDC		540 VDC / 800 VDC	
Start-up Voltage	120 VDC		250 VDC	
MPPT Voltage Range	120 VDC - 420 VDC		250 VDC - 780VDC	
Number of MPP Trackers	1			
AC INPUT				
Input Voltage	220/230/240 VAC (-15% - +10%)		N/A	
Input Frequency	47 Hz - 63 Hz		N/A	
OUTPUT				
Nominal Voltage	220/230/240 VAC		3 x 380/400/415/440 VAC	
Efficiency	> 97%		> 97%	
Nominal Output Current	14 A	10 A	5.0 A	15 A
Motor Type	Single-phase motor	Three-phase asynchronous motor	Three-phase asynchronous motor	
Frequency Precision	±0.2%			
PROTECTION				
Full Protection	Phase lost, dry pumping, motor locked, weak sunlight, over-voltage, under-voltage, over-current, surge, over-temperature and short circuit protection			
PHYSICAL				
Dimension, D X W X H (mm)	110 x 230 x 342			
Net Weight (kgs)	5	5.5	6	6.5
IP Protection	IP20			

Figura A4. Especificaciones técnicas del controlador Quadro 11 kW.