

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN

DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO
FOTOVOLTAICO PARA RIEGO AGRÍCOLA EN EL
CENTRO POBLADO PUERTO TAMBORAPA, DISTRITO
CHIRINOS - SAN IGNACIO

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Autores : Bach. Elver Bermeo Herrera
Bach. Alfredo Silva Acuña

Asesor : Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez

JAÉN – PERÚ

2022



FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 14 de marzo del año 2022, siendo las 11:00 horas, se reunieron de manera virtual los integrantes del Jurado:

Presidente: Mg. Jannier Alberto Montenegro Juárez

Secretario: Mg. Jaime Odar Honorio Acosta

Vocal: Mg. Marcos Antonio Gonzáles Santisteban

para evaluar la Sustentación del Informe Final:

() Trabajo de Investigación

(**X**) Tesis

() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado:

"Diseño de un Sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el Centro Poblado Puerto Tamborapa, distrito de Chirinos - San Ignacio", presentado por el **Bach. Elver Bermeo Herrera y el Bach. Alfredo Silva Acuña**, de la Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

(**X**) Aprobar () Desaprobar (**X**) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|---------------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | () |
| c) Bueno | 14, 15 | (15) |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ò menos | () |

Siendo las 12:10 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Presidente del jurado

Vocal del Jurado

Secretario del Jurado

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación lo dedico a mis padres, Efrain Bermeo Romero y Lorenza Herrera Zurita por sus buenos consejos y enseñanzas para poder terminar mi carrera profesional. A mi madre por ser una persona que me acompaño durante toda esta etapa profesional. A toda mi familia por estar pendiente de mis estudios.

Elver

Este trabajo de investigación lo dedico a mis queridos padres, Limber Andrés Silva Mejía y María Magdalena Acuña Delgado, por todo su apoyo que me han brindado día a día, y aquellas personas que de alguna forma me motivaron a esforzarme.

Alfredo

AGRADECIMIENTO

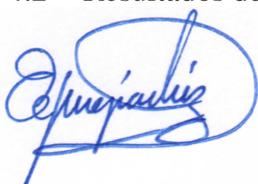
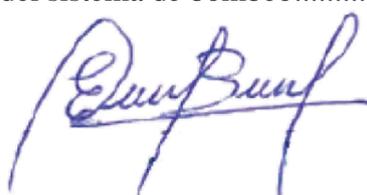
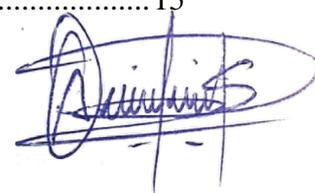
Agradecemos en primer lugar a Dios por la vida y permitirnos seguir adelante cada día, por darnos la valentía y ánimos a seguir esforzándonos para cumplir esta meta, indispensable es el agradecimiento a nuestras familias por el apoyo incondicional y dedicación. También agradecemos particularmente al Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez por su amabilidad y tiempo para guiarnos en concluir este trabajo de investigación.

Los Autores



INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Realidad problemática	4
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Justificación	5
1.4.1 Social	5
1.4.2 Ambiental	6
1.4.3 Económica	6
II OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
2.3 Hipótesis	7
III MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1 Tipo de investigación empleada	8
3.2 Ubicación geográfica de la zona de estudio	8
3.3 Procedimiento y metodología de cálculo	9
IV. RESULTADOS	13
4.1 Resultados de radiación solar en la zona del proyecto	13
4.1.1 Resultados de cálculo de orientación e inclinación	13
4.2 Resultados de la potencia del sistema de bombeo	15

4.2.1	Resultados demanda hídrica	15
4.2.2	Resultados demanda de energía.....	17
4.3	Resultados de dimensionamiento del sistema de bombeo	19
4.3.1	Resultados mes más desfavorable	19
4.3.2	Resultados energía eléctrica necesaria	21
4.3.3	Resultados de potencia del generador fotovoltaico	22
4.3.4	Resultados caudal pico de la bomba.....	23
4.3.5	Resultados selección y justificación de la bomba	24
4.3.6	Resultados de selección y justificación del sistema de potencia	26
4.3.7	Resultados selección y justificación sistema generación fotovoltaica ..	27
4.3.8	Resultados de cálculo de conductores	29
4.3.9	Sistemas de puesta a tierra.....	30
4.3.10	Estructura de soporte de los paneles fotovoltaicos.....	30
4.3.11	Sistema de almacenamiento	31
4.3.12	Resumen de resultados del cálculo teórico.....	32
4.3.13	Componentes y topología del sistema de bombeo fotovoltaico	34
4.4	Resultados con herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO.....	34
4.4.1	Datos de entrada y selección de equipos simulación en SISIFO	35
4.4.2	Resultados de simulación en SISIFO	46
4.5	Resultados de evaluación económica.....	50
4.5.1	Evaluación económica sistema de bombeo fotovoltaico	51
V.	DISCUSIÓN	56
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
6.1	Conclusiones	59
6.2	Recomendaciones.....	61
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	62

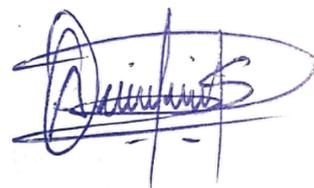
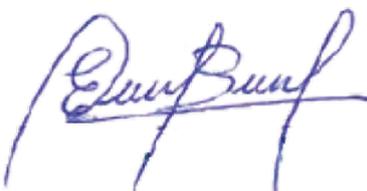
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Radiación diaria promedio en la zona del proyecto, kWh/m ² /día.....	13
Tabla 2 Interpolación de la radiación diaria promedio para el ángulo óptimo calculado, kWh/m ² /día	14
Tabla 3 Necesidades de agua diaria del maíz durante todo el ciclo vegetativo	16
Tabla 4 Cálculo del cociente entre necesidad de energía e irradiación	20
Tabla 5 Cálculo de conductores del sistema de bombeo fotovoltaico.....	30
Tabla 6 Variables hidráulicas del sistema de bombeo fotovoltaico	32
Tabla 7 Resumen de cálculos de producción energética sistema de bombeo fotovoltaico	32
Tabla 8 Resumen de componentes del sistema de bombeo fotovoltaico dimensionado.	33
Tabla 9 Resultados detallados de producción energética diaria, plano horizontal.....	48
Tabla 10 Producción energética anual, plano horizontal.	49
Tabla 11 Presupuesto sistema de bombeo fotovoltaico dimensionado.	51
Tabla 12 Costos anuales de operación y mantenimiento, sistema de bombeo fotovoltaico	52
Tabla 13 Resultados Costo Nivelado de Energía Eléctrica (LCOE) del sistema fotovoltaico.	54
Tabla 14 Resultados de evaluación económica sistema de bombeo fotovoltaico.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Emplazamiento de la zona de estudio.....	8
Figura 2 Procedimiento calculo del sistema de bombeo fotovoltaico	9
Figura 3 Flujos de energía en el sistema de riego fotovoltaico a dimensionar	10
Figura 4 Configuración general para la simulación del sistema de riego fotovoltaico....	11
Figura 5 Comportamiento de la radiación diaria promedio para diferentes angulos de inclinación, kWh/m ² /día.....	15
Figura 6 Esquema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola.....	18
Figura 7 Comportamiento del cociente entre necesidad de energía e irradiación.....	20
Figura 8 Curva de funcionamiento bomba Caprari E6SX55/3X+MACW612A	25
Figura 9 Configuración del campo solar dimensionado (2x12), panel SpolarPV SP470M6-96	29
Figura 10 Estructura de soporte elevada, disposición de los módulos vertical [2x12]..	30
Figura 11 Componentes y topología del sistema de bombeo fotovoltaico dimensionado	34
Figura 12 Interfaz de entrada de SISIFO	35
Figura 13 Datos meteorológicos- Irradiación diaria (media mensual)	36
Figura 14 Datos de entrada módulos fotovoltaicos.....	37
Figura 15 Parámetros generador fotovoltaico antes de seleccionar la estructura	37
Figura 16 Parámetros de la estructura.....	38
Figura 17 Parámetros del Inversor	38
Figura 18 Busca de inversores/Variadores mas adecuados.....	39
Figura 19 Selección del Inversor /Variador MX2 11 kW, 380 V CA adecuado.....	39
Figura 20 Cableado del sistema de bombeo.....	40
Figura 21 Parámetros del sistema de bombeo.....	41
Figura 22 Curvas altura H-Caudal Q de las bombas encontradas	42
Figura 23 Curvas potencia en el eje P-Caudal Q de las bombas encontradas	42
Figura 24 Curvas de cada conjunto bomba – motor encontrado.....	43
Figura 25 Bomba E6SX55/4P+MACW610A-8V seleccionada.....	43
Figura 26 Curvas de la bomba E6SX55/4P+MACW610A-8V seleccionada.....	44

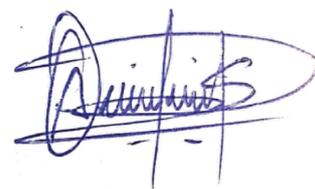
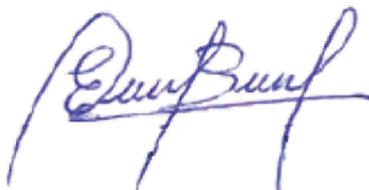
Figura 27 Motor MACW610/3A-8 seleccionado	44
Figura 28 Curva de eficiencia del Motor MACW610/3A-8 seleccionado	45
Figura 29 Simulación del sistema de bombeo.....	45
Figura 30 Irradiación diaria (media mensual).....	46
Figura 31 Producción energética diaria, plano horizontal.....	47
Figura 32 Rendimientos globales, plano horizontal.....	47
Figura 33 Comportamiento de resultados detallados de producción energética diaria, plano horizontal.....	48
Figura 34 Comportamiento de la producción energética anual, plano horizontal	49
Figura 35 Resultados de producción de bombeo anual	50



RESUMEN

El objetivo de la investigación fue diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el centro Poblado Puerto Tamborapa, distrito de Chirinos -San Ignacio, para cultivo de maíz. El agua y la energía son los principales motores de la producción agrícola y el mundo se enfrenta a una grave crisis de agua y energía; asimismo la generación de energía fotovoltaica se ha convertido en una respuesta natural para la creciente demanda de energía en la agricultura, y han ganado mucha atención como reemplazo de los combustibles fósiles. La metodología que se utilizó es de tipo aplicada, con un nivel de investigación descriptiva y un diseño de investigación campo gabinete. Se determinó la radiación solar en la zona de estudio con datos obtenidos de la NASA, también se determinó la potencia del sistema de bombeo para lo cual primeramente se determinó la demanda hídrica y altura manométrica total. Luego se dimensionó cada componente del sistema de bombeo fotovoltaico y cálculos de producción de energía. Por otra parte se realizó una simulación del sistema de bombeo fotovoltaico con la herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO, que permitió seleccionar los componentes y simular parámetros de producción energética, y comparar con los cálculos teóricos. Finalmente la evaluación económica del sistema de bombeo fotovoltaico resultó rentable con un VAN de S/. 7933.12 positivo y un TIR 12 %, el tiempo de recuperación es a largo plazo (15 años); se consideró un LCOE calculado de 0.67 S/./kWh, interés para el VAN de 10 %, vida útil 20, y un costo de reinversión (año 10) de S/.11500.00 para el inversor y la bomba.

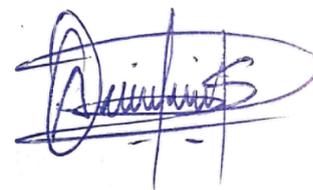
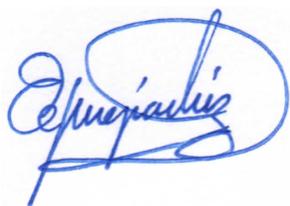
Palabras clave: Diseño, sistema de bombeo, fotovoltaico, riego agrícola, radiación solar, evaluación económica.



ABSTRACT

The objective of the research was to design a photovoltaic pumping system for agricultural irrigation in the Poblado Puerto Tamborapa center, Chirinos-San Ignacio district, for corn cultivation. Water and energy are the main drivers of agricultural production and the world is facing a serious water and energy crisis; Likewise, photovoltaic power generation has become a natural response to the growing energy demand in agriculture, and has gained much attention as a replacement for fossil fuels. The methodology used is of an applied type, with a descriptive research level and a cabinet field research design. Solar radiation in the study area was determined with data obtained from NASA, the power of the pumping system was also determined, for which the water demand and total manometric height were first determined. Then each component of the photovoltaic pumping system and energy production calculations were dimensioned. On the other hand, a simulation of the photovoltaic pumping system was carried out with the SISIFO photovoltaic simulation tool, which allowed selecting the components and simulating energy production parameters, and comparing them with the theoretical calculations. Finally, the economic evaluation of the photovoltaic pumping system was profitable with a NPV of S/. 7933.12 positive and an IRR 12%, the recovery time is long-term (15 years); a calculated LCOE of 0.67 S/./kWh was considered, interest for the NPV of 10%, useful life 20, and a reinvestment cost (year 10) of S/.11500.00 for the inverter and the pump.

Keywords: Design, pumping system, photovoltaic, agricultural irrigation, solar radiation, economic evaluation.



I. INTRODUCCIÓN

El agua y la energía son los principales motores de la producción agrícola y el mundo se enfrenta a una grave crisis de agua y energía. Debido al aumento de la población mundial, la necesidad de una mayor productividad agrícola por unidad de área es absolutamente necesaria. Las crecientes tensiones en la relación agua-energía y su interdependencia son más evidentes. Por tanto, se necesita un enfoque sostenible para garantizar la seguridad alimentaria y energética (Schilardi et al., 2014). Además, la utilización de la conversión fotovoltaica de la energía solar para alimentar las bombas de agua es una tecnología emergente con grandes desafíos. La tecnología fotovoltaica se puede aplicar a mayor escala y también presenta una alternativa ambientalmente favorable a las bombas de agua convencionales que funcionan con combustibles fósiles (diésel y electricidad). Además, la importancia de la energía solar fotovoltaica para impulsar las bombas de agua aumenta debido al continuo agotamiento de las reservas de petróleo, la distribución desigual y el costo cada vez mayor de la electricidad, que es un área de gran preocupación para los países en desarrollo (Sontake y Kalamkar, 2016).

La energía solar fotovoltaica es apropiado para lugares remotos, cuando no se tiene conexión a la red eléctrica. Además, el costo de entregar combustibles fósiles a lugares remotos es elevado. La energía solar es ideal para el riego agrícola, ya que la mayor parte del riego se requiere cuando el sol brilla intensamente. En consecuencia, un sistema de riego con energía fotovoltaica es una tecnología prometedora que podría ayudar a satisfacer las necesidades de riego de tierras agrícolas remotas. Los métodos de riego de alta eficiencia, son los sistemas de riego por aspersión y goteo (Sado et al., 2018).

El Perú posee una radiación solar alta, la zona norte y sur del país son los lugares donde se presenta el mayor potencial solar, dicho fenómeno se debe a diversos factores entre los cuales se puede resaltar su cercanía hacia la línea ecuatorial. Además, en el departamento de Cajamarca, y específicamente en la zona del proyecto existe escasa información por el aprovechamiento de las fuentes no convencionales (energías renovables) y sus innumerables aplicaciones. Debido a ello con la finalidad de contribuir e incentivar al uso de energías limpias en la región, la presente investigación tiene como objetivo diseñar un sistema de



bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el Centro Poblado Puerto Tamborapa, Distrito Chirinos - San Ignacio, para una hectárea de cultivo de maíz.

1.1 Antecedentes

Ortega y Diez (2013) instalaron un sistema de riego por goteo para el cultivo del maíz en San Cebrián de Campos (Palencia). El promotor desea dedicar la finca al cultivo de maíz, con la finalidad de incrementar sus beneficios, al establecer un cultivo más productivo. Dicha finca está considerada de regadío al disponer de una concesión de agua de 20 l/s del Canal de Castilla para su riego. Se dispone de electricidad en la zona, la parcela ocupa una superficie total de 36 441m², con una forma irregular. La finca será cultivada en su totalidad, y la caseta tendrá una superficie de 18 m². El sistema de riego instalado en dicha parcela es por goteo, diseñando un sistema de automatización del riego con 2 sectores, con dos electrobombas alternas de 15 kW. Así como, 2 depósitos de 500 litros de capacidad y una bomba eléctrica dosificadora para realizar fertirrigación (abonado de cobertera). El presupuesto asciende a € 60023.94, vida útil de la explotación de 15 años, considerando por tanto un VAN de € 24508.84, y TIR de 5.43, dando rentabilidad del proyecto.

Teves (2018) desarrolló soluciones técnicas para el funcionamiento fiable y eficiente de sistemas híbridos de riego fotovoltaico (FV) de alta potencia. Estas soluciones técnicas se han aplicado al diseño e instalación de dos demostradores de riego FV por goteo a escala real, uno de 140 kWp híbrido FV-diésel en Alter do Chão, Portugal, y otro de 120 kWp híbrido FV-red en Tamelalt, Marruecos. A nivel económico, la inversión inicial en ambos sistemas es 1.2 €/Wp, el período de retorno de la inversión es 8.8 años en Portugal y 7 en Marruecos y, finalmente, el costo nivelado de energía es 0.13 €/kWh en Portugal y 0.07 €/kWh en Marruecos, llevando a ahorros del 61% y 66% en Portugal y Marruecos, respectivamente. Finalmente, propone un nuevo método de selección de bombas para sistemas de riego FV a frecuencia variable. Utilizó la herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO para 3 lugares distintos de la cuenca mediterránea, demuestra que el volumen de agua bombeada por un sistema de riego FV con una bomba seleccionada por este nuevo método tiene incrementos entre el 7.3 y el 20.5% cuando se compara con una bomba seleccionada con el método tradicional.

Calero (2017) realizó la instalación de riego con bombeo solar fotovoltaico en Benlloch - España, este sistema de bombeo ha sido instalado para la producción de patata y tomate. Con software CROPWAT 8.0 determinaron las necesidades de agua mes por mes que va a demandar la plantación. Así mismo mediante el software PVSYST diseñó y calculó la parte del sistema fotovoltaico que se observa que coinciden con los cálculos teóricos y finalmente con el software EPANET se han obtenido los cálculos de presiones y caudales del sistema, y asegurar que el sistema funcione correctamente.

Dávalos (2019) diseñó un sistema de bombeo fotovoltaico para una hectárea de riego agrícola en el caserío la Guayaba, Distrito de Bellavista, Provincia de Jaén –Cajamarca, para cultivo de yuca. Muestra la evaluación del recurso solar disponible para diferentes ángulos de inclinación con datos obtenidos de la NASA, obteniendo como resultado 3.71 kWh/m²/día de radiación solar y un ángulo óptimo de 7.5°. También presenta la demanda hídrica de 40 m³/día, requirió 3117.4 Wh/día de energía hidráulica. La elección de la motobomba se realizó en función al caudal pico y la altura total, seleccionando una motobomba solar de corriente continua modelo PS1800 C-SJ8-7. Se seleccionaron 16 paneles fotovoltaicos del tipo LC100-M36, 8 paneles en serie y 2 en paralelo para satisfacer la potencia de generación de 1.72 kW. La evaluación económica resultó con un VAN de \$ 15 976.67 y un TIR 9%.

Herrera y Vera (2020) dimensionaron un sistema de bombeo solar para riego agrícola en el centro poblado Roblepampa, Utcubamba–Amazonas, para cultivo de café. Con datos de la NASA determinaron el mes de dimensionado febrero que dispone en promedio de 3.68 kWh/m²/día, y una inclinación óptima de 7.88°. La energía hidráulica resultó 0.96 kWh/día, y una altura total equivalente de 11 m, la potencia para el generador es 1.03 kW. El generador fotovoltaico de bombeo requiere 9 paneles de 135 Wp conectados en serie; 01 Controlador Solar SubDrive, 1.1 kW, y 01 electrobomba centrífuga solar sumergida marca Pedrollo, modelo 4SR75Gm/15, monofásica, 1.1 kW, 60 Hz, y 3450 Rpm, caudal pico de la bomba de 20.66 m³/h. La evaluación económica con respecto a un sistema de generación a gasolina, resultó un VAN de S/. 8 979.37 positivo, y TIR del 18.20 %, y el tiempo de recuperación de 08 años, para un interés del VAN del 10 % y vida del proyecto 20 años.

1.2 Realidad problemática

El agua es una necesidad para sobrevivir. Es necesario para beber y usos domésticos, y se requiere para la irrigación a gran escala, la construcción y la producción de energía. El agua juega un papel importante en el desarrollo de cualquier país. La calidad de vida en cualquier país depende en gran medida de la cantidad y calidad de los recursos hídricos disponibles en un país. Se estima que se requiere un promedio de cinco litros de agua dulce por persona por día para la supervivencia diaria. Aunque hay una gran cantidad de agua de alta calidad en el mundo, a menudo no está disponible en lugares donde se puede usar fácilmente (Aliyu et al., 2018).

Los sistemas de bombeo de agua con energía solar fotovoltaica se promocionan cada vez más como una alternativa atractiva al bombeo de agua frente a los grupos electrógenos diésel convencionales. El nexo agua-energía surge de la interconexión del papel fundamental que desempeña el agua en la producción de energía y la necesidad de energía en la cadena productiva del agua principalmente en la captación y conducción (Otieno et al., 2018). Sin embargo el sector agrícola muestra una tasa de crecimiento muy lenta, a veces también negativa. La agricultura requiere principalmente de los recursos valiosos, agua y electricidad, estos dos son análogos entre sí debido al impacto similar en el sector agrícola. Así la conservación de estos recursos evitaría el deterioro del sector agricultura. En los últimos años, el desarrollo de fuentes de energía renovable, y la tecnología solar fotovoltaica, está siendo popular. Debido a la salida de energía de alta calidad, las células fotovoltaicas se utilizan para hacer funcionar los equipos eléctricos directamente, y una de las aplicaciones notables de la energía solar fotovoltaica es proporcionar electricidad a las bombas de agua agrícolas (Korpale et al., 2016).

Por otra parte la agricultura moderna depende en gran medida del suministro energético obtenido principalmente de combustibles fósiles. Es una respuesta natural que la tecnología fotovoltaica se aplique al sector agrícola, llamado agricultura fotovoltaica, es decir, la generación de energía solar fotovoltaica se utiliza para suministrar electricidad y sostenible para actividades de producción agrícola como la siembra, la cría, el riego, etc (Xue, 2017).

La mayoría de estudios mencionados se centran en el diseño y el rendimiento del sistema de bombeo de agua fotovoltaico integrado con su análisis económico. En la zona del proyecto no se cuenta con el suministro de energía eléctrica, la red de media tensión se encuentra muy alejado aproximadamente a 1km. Los agricultores en la zona utilizan bombas de agua convencionales que funcionan con combustibles (diésel y gasolina) para regar sus sembríos de maíz en épocas o meses de verano. La provincia de San Ignacio tiene un gran potencial de energía solar debido a la disponibilidad de alta irradiación solar durante todo el año. El Poblado Puerto Tamborapa, ubicado en la parte norte de la Región, recibe intensidades solares más altas durante la mayor parte del año. Teniendo en cuenta la ventaja climática, existe la posibilidad de diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola utilizando bombas sumergibles alimentadas por paneles fotovoltaicos. Para aprovechar la energía solar de manera eficiente y económica en una instalación de este tipo, es necesaria la optimización del diseño del conjunto fotovoltaico y la evaluación del rendimiento, comparando los cálculos teóricos con lo simulado mediante alguna herramienta de simulación fotovoltaica.

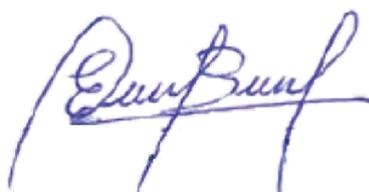
1.3 Planteamiento del problema

¿Cual sera el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el centro Poblado Puerto Tamborapa, Distrito de Chirinos - San Ignacio?.

1.4 Justificación

1.4.1 Social.

En la comunidad de Puerto Tamborapa no se ha realizado un proyecto de esta naturaleza con energías renovables, por lo que marcaría la diferencia en comparación con los sistemas convencionales de abastecimiento de agua que dependen de la energía obtenida de los combustibles convencionales para su funcionamiento. Además abriría las puertas para la implementación de proyectos que utilicen energías alternativas logrando así llevar el agua donde este desprovisto de este servicio. Tendrá un impacto positivo en la población debido a que



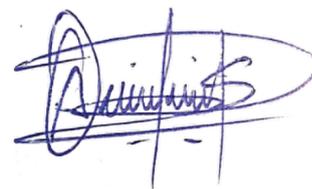
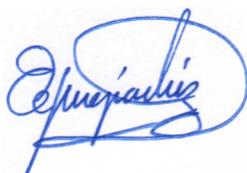
con el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola, ayuda a resolver problemas que afectan a un grupo social, y que originará puestos de trabajo en el sembrío y cuidado de maíz.

1.4.2 Ambiental.

El diseño del sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola, logrará la disminución de los gases contaminantes producidos por las motobombas empleadas en el sistema de riego, ya que este aprovechará la radiación solar para poder generar energía eléctrica. Por ese motivo, esta investigación es necesaria porque en la zona del proyecto el bombeo de agua se hace con un motor alimentado con combustible diésel el cual emite gases tóxicos al quemar dicho combustible, adicional a esto el mal manejo de almacenamiento del combustible hace que se derrame a la hora de alimentar el motor, contaminando también el suelo. El aceite que utiliza para lubricar sus engranajes y el sonido que emite a la hora de combustionar también contaminan el medio ambiente. Ante esta problemática se propone utilizar energía solar fotovoltaica para bombeo de agua, con fines de riego agrícola.

1.4.3 Económica.

En la zona existente quema combustible diésel para obtener energía eléctrica y a su vez bombear agua, elevando los costos de producción cada año. Mientras el sistema que se propone como todo proyecto de ingeniería tiene su costo inicial alto, pero post ejecución del mismo el costo por mantenimiento es mínimo, y consumo de combustible casi nulo. Además el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola, permitirá que el promotor o dueño de la parcela tenga mayor producción de maíz de calidad para su consumo y venta de ser necesario. Por otra parte el proyecto justifica su rentabilidad.



II OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

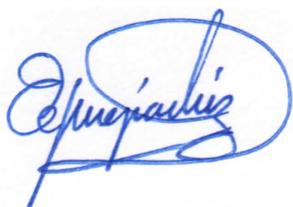
Diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el centro Poblado Puerto Tamborapa, Distrito de Chirinos - San Ignacio.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la radiación solar en la zona del proyecto.
- Determinar la potencia del sistema de bombeo.
- Dimensionar el sistema de bombeo para riego agrícola.
- Simular el sistema de bombeo con la herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO.
- Evaluar económicamente el proyecto.

2.3 Hipótesis

La radiación solar, y la potencia del sistema del bombeo; influyen en el diseño y simulación de un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el Centro Poblado Puerto Tamborapa, Distrito Chirinos-San Ignacio.



III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Tipo de investigación empleada

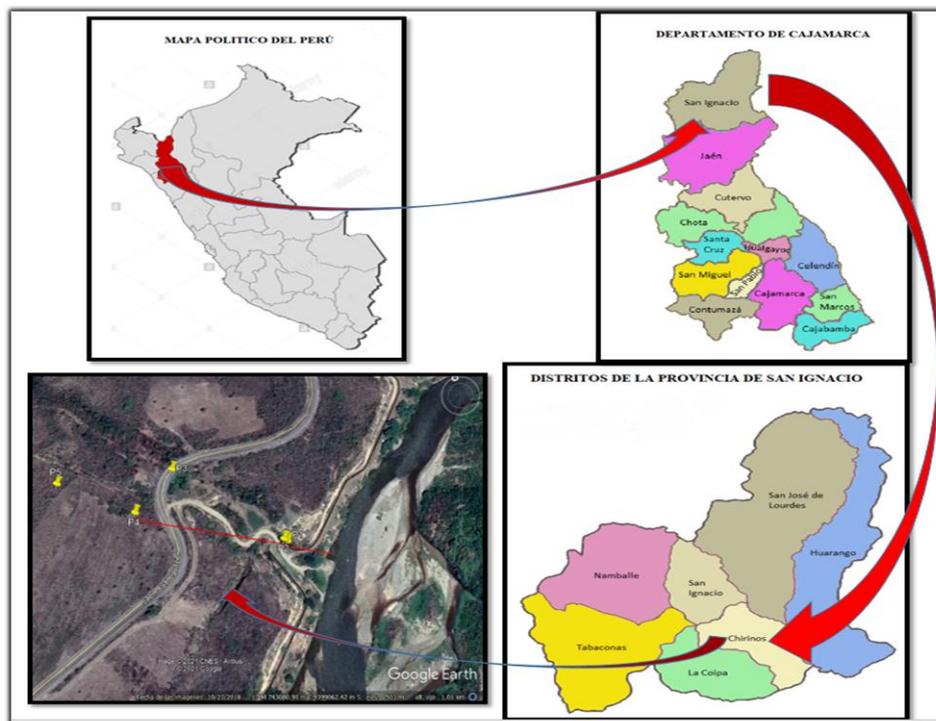
Por la naturaleza de los objetivos, y la metodología utilizada en la investigación es de tipo aplicada, con un nivel de investigación descriptiva y un diseño de la investigación campo gabinete (no experimental).

3.2 Ubicación geográfica de la zona de estudio

La zona de estudio de la investigación es el centro poblado Puerto Tamborapa, el cual está ubicado en el departamento de Cajamarca, provincia de San Ignacio, las coordenadas geográficas de la zona de estudio tiene una latitud: $-5,43317^{\circ}$ y longitud: -78.80745° . En la Figura 1, se muestra el emplazamiento de la zona de estudio.

Figura 1

Emplazamiento de la zona de estudio



[Handwritten signature]

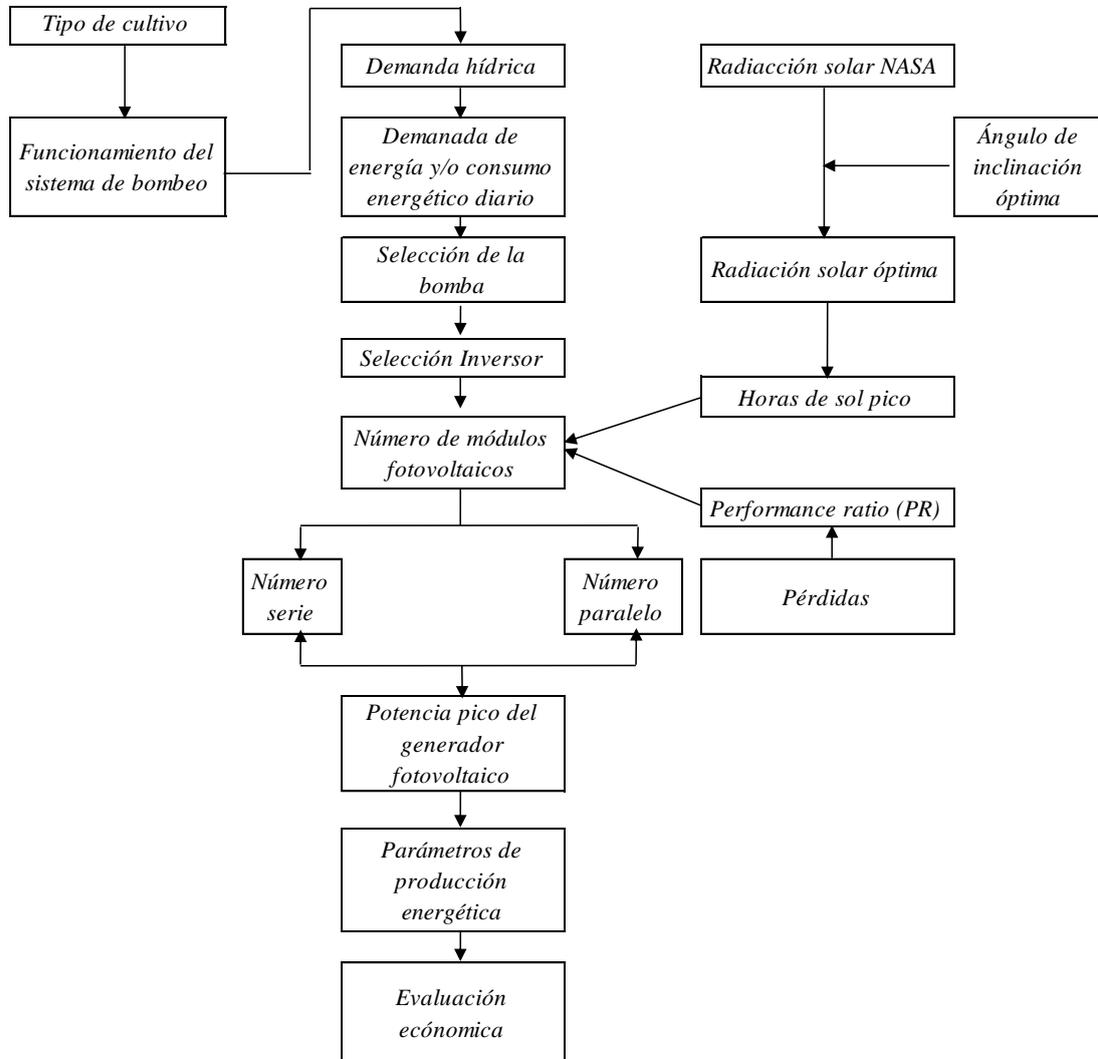
[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

3.3 Procedimiento y metodología de cálculo

Figura 2

Procedimiento calculo del sistema de bombeo fotovoltaico



Para los cálculos teóricos, se utiliza la radiación media mensual, obtenido de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA); y para la simulación, data de la herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO. Luego se procede a determinar el ángulo de inclinación óptimo y la radiación solar óptima. Así mismo, una vez identificado el tipo de cultivo y área de la parcela se determina la demanda hídrica para 01 hectárea de cultivo de maíz, consumo energético diario, y selección de la bomba e inversor. Tomando el consumo energético diario, y la radiación solar óptima, se determina la cantidad de paneles fotovoltaicos (serie y paralelo), y la potencia pico del generador

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

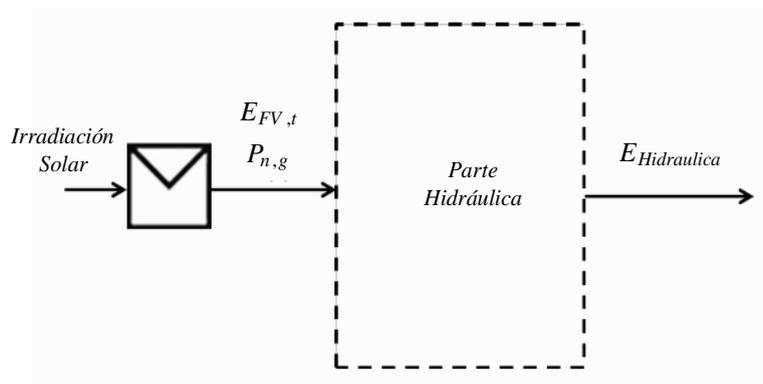
[Handwritten signature]

fotovoltaico. También se determina los parámetros de producción energética del sistema. La evaluación económica se realiza para el sistema de bombeo fotovoltaico. En la Figura 2, se muestra el procedimiento de cálculo para el dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico.

En la Figura 3, se muestra los flujos de energía involucrados en el sistema de riego fotovoltaico a dimensionar.

Figura 3

Flujos de energía en el sistema de riego fotovoltaico a dimensionar



Parámetros de producción del sistema de bombeo fotovoltaico

Para los parámetros de producción de energía es primordial definir las variables eléctricas, climatológicas y de acimut. El cálculo preciso de dicha energía es muy complejo, debido fundamentalmente, a las variables climatológicas (irradiancia y temperatura). Por esta razón, se definen los parámetros característicos, que diferencian los distintos sistemas fotovoltaicos independientemente del comportamiento de las condiciones medioambientales. Para optimizar la producción de energía, es primordial definir y configurar fielmente en algún programa (Osorio y Montero, 2016). Para el proyecto se realiza cálculos teóricos aproximados, y para la simulación se utiliza la herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO.

Según Osorio y Montero (2016), indica que la productividad del generador fotovoltaico (Y_{GF}), definida en la Ecuación (1), es la energía producida por el generador

fotovoltaico en un determinado período de tiempo ($E_{GFV,t}$) y por unidad de potencia instalada. Así mismo la Productividad Final (Y_F), definida en la Ecuación (2), es la energía útil producida por el sistema en un cierto período de tiempo ($E_{FV,t}$) y por unidad de potencia instalada.

$$Y_{GF} = \frac{E_{GFV,t}}{P_{n,g}} \quad (1)$$

$$Y_F = \frac{E_{FV,t}}{P_{n,g}} \quad (2)$$

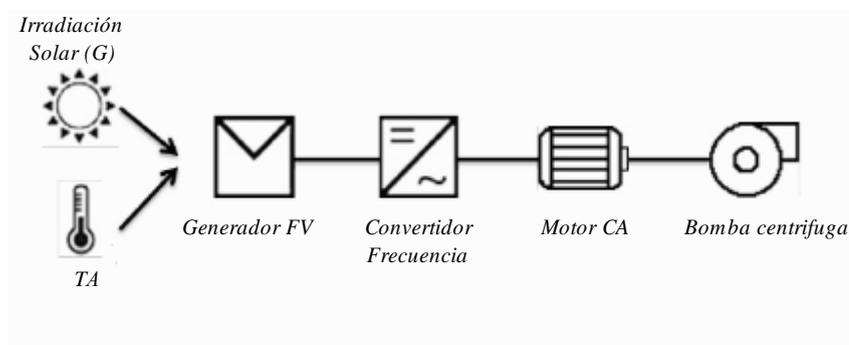
Procedimiento de simulación del sistema de bombeo con herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO.

El SISIFO permite la simulación de diferentes tipos de sistemas de riego fotovoltaicos, como los denominados sistemas de bombeo a una piscina de agua, o los sistemas de bombeo a presión constante (también denominado bombeo directo).

La Figura 4, muestra la configuración general del sistema de riego fotovoltaico simulado, que se compone de un generador fotovoltaico, un convertidor de frecuencia, un motor de CA y una bomba centrífuga.

Figura 4

Configuración general para la simulación del sistema de riego fotovoltaico



[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

Indicadores económicos para evaluación económica

Para evaluación económica se utiliza indicadores que permiten evaluar la implementación del sistema de bombeo. Los indicadores que se utilizan son el Valor Actual Neto (VAN), y a la Tasa de Interna de Retorno (TIR). La evaluación se realiza de acuerdo a la vida útil del sistema que se estima de 20 años. El valor presente de un activo que genere un flujo efectivo para n años se determina con las Ecuación (3). Así mismo la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) al tipo de interés R , que hace su valor neto igual a cero, se determina con la Ecuación (4).

Se considera efectuable la inversión, cuando R sea mayor que la rentabilidad mínima. Se rechaza cuando es inferior. El TIR puede usarse como indicador de rentabilidad de un proyecto.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i_t)^t} - I \quad (3)$$

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+R)^t} - I = 0 \quad (4)$$

Donde:

I : Valor del desembolso inicial

F_t : Flujos de caja en cada periodo

i_t : Es la rentabilidad mínima

n : Años que dura la inversión

R : Tipo de interés o tasa de retorno

IV. RESULTADOS

4.1 Resultados de radiación solar en la zona del proyecto

Utilizando las coordenadas del lugar (latitud: -5.43° y longitud: -78.81°), se recopilaron datos de radiación solar del aplicativo de la NASA de 30 años (enero de 1984 - diciembre de 2013) disponible a la fecha de consulta, agosto 2021. La Tabla 1, muestra la radiación diaria promedio en diferentes ángulos de inclinación en la zona del proyecto.

Tabla 1

Radiación diaria promedio en la zona del proyecto, kWh/m²/día

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
$G_{dm} (0^\circ)$	4.10	3.71	4.19	4.19	4.26	4.18	4.30	4.61	4.91	4.89	5.11	4.56
$G_{dm} (5.43^\circ)$	4.02	3.67	4.19	4.24	4.38	4.33	4.44	4.70	4.93	4.84	5.00	4.45
$G_{dm} (10^\circ)$	4.18	3.72	4.14	4.04	4.00	3.86	3.99	4.38	4.80	4.90	5.23	4.69
$G_{dm} (20^\circ)$	3.68	3.47	4.05	4.25	4.55	4.59	4.67	4.79	4.83	4.56	4.53	4.00
$G_{dm} (90^\circ)$	1.48	1.48	1.57	2.06	2.63	2.90	2.81	2.46	1.86	1.50	1.45	1.48

Nota. Datos NASA (2021).

4.1.1 Resultados de cálculo de orientación e inclinación

Los sistemas fotovoltaicos deben tener un ángulo de inclinación, dependiendo de la zona donde se ubica, para favorecer de este modo su auto limpieza y evitar que elementos como hojas, polvo cubran el panel (Mejía, 2019). Para determinar el ángulo de inclinación del sistema se utilizó la Ecuación (5). Como resultado se obtuvo que el ángulo óptimo de inclinación es 7.44° , para una latitud de -5.43° .

$$\beta_{opt} = 3.7 + (0,69 \times |\varphi|)$$

$$\beta_{opt} = 3,7 + (0,69 \times |-5.43|)$$

$$\beta_{opt} = 7.44^\circ$$

Donde:

$|\varphi|$: latitud del lugar sin signo

Para determinar la radiación para el ángulo óptimo de 7.44° , interpolamos entre los ángulos de 5.43° que corresponde a la latitud de la zona y 10° obtenidos del aplicativo de la NASA. Los resultados de la interpolación de radiación se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Interpolación de la radiación diaria promedio para el ángulo óptimo calculado, kWh/m²/día

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
G _{dm} (5.43°)	4.02	3.67	4.19	4.24	4.38	4.33	4.44	4.70	4.93	4.84	5.00	4.45
G _{dm} (7.44°)	4.09	3.69	4.17	4.15	4.21	4.12	4.24	4.56	4.87	4.87	5.10	4.56
G _{dm} (10°)	4.18	3.72	4.14	4.04	4.00	3.86	3.99	4.38	4.80	4.90	5.23	4.69

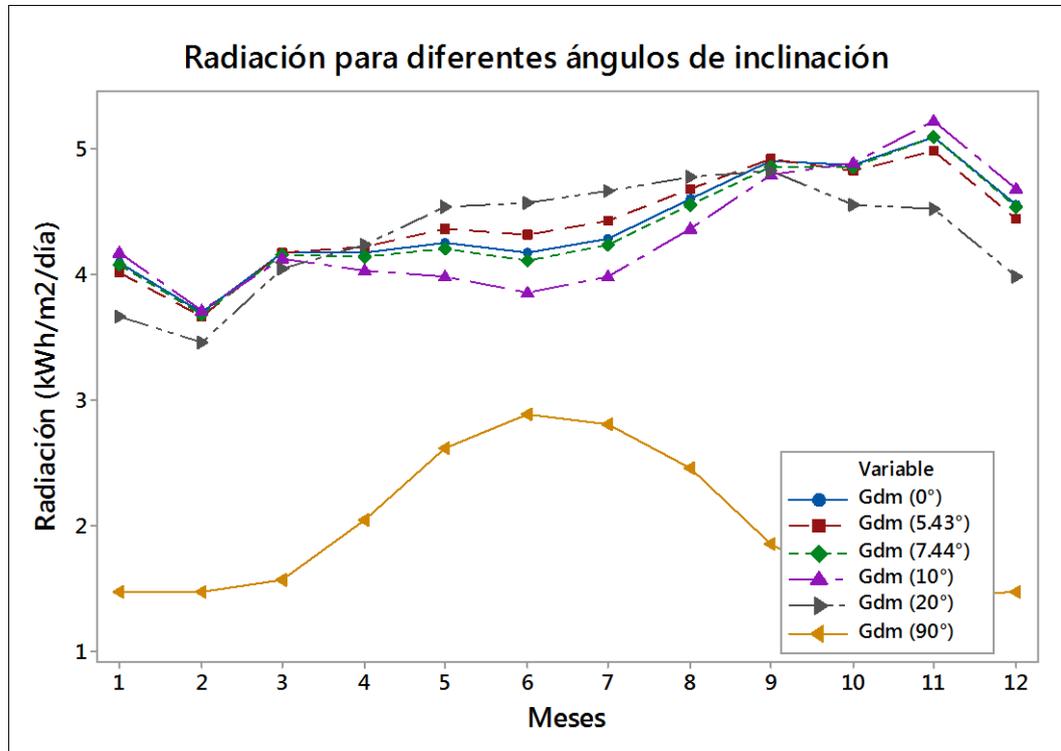
Nota. Datos NASA (2021).

En la Figura 5, se muestra el comportamiento de la radiación solar para diferentes ángulos de inclinación. Se verifica un comportamiento similar de la radiación para ángulos de inclinación 0° , 5.43° , 7.44° y 10° , el mes con menor radiación solar durante el año es febrero.

Por lo tanto, para el diseño del sistema de generación fotovoltaica se tomó el mes más desfavorable para el ángulo de inclinación óptima calculada (7.44°) que resulta 3.69 kWh/ m²/día.

Figura 5

Comportamiento de la radiación diaria promedio para diferentes ángulos de inclinación, kWh/m² /día



Nota. Datos NASA (2021)

4.2 Resultados de la potencia del sistema de bombeo

Para el diseño de sistema de bombeo fotovoltaico, primeramente es importante conocer la demanda hídrica y la altura total equivalente para poder elegir el tamaño de la bomba eléctrica y el sistema fotovoltaico.

4.2.1 Resultados demanda hídrica

Según Ortega y Diez (2013) las necesidades diarias del cultivo de maíz, corresponden con la vapotranspiración de dicho cultivo (ETc). Estas se expresan en mm de agua al día, lo que corresponde a litros/m², los datos que se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3

Necesidades de agua diaria del maíz durante todo el ciclo vegetativo

Etapas	Coefficiente de cultivo (Kc)	Días	Necesidades diarias (mm/día)= litros/m²
Primera etapa (30 días)	Abarca desde la siembra hasta que el cultivo cubre un 10% del suelo (Kc1).	5	1.64
		25	2.01
Segunda etapa (50 días)	Abarca desde el final de la etapa anterior hasta que el cultivo cubre la máxima superficie del suelo, aunque las plantas no hayan alcanzado todavía el tamaño máximo (Kc2)	7	4.03
		30	4,64
Tercera etapa (49 días)	Comprende desde la floración y la formación del fruto, hasta la maduración (Kc3)	18	6.89
		31	6.59
Cuarta etapa (50 días)	Abarca desde la maduración hasta la recolección (Kc4)	11	5.36
		19	3.26
		20	2.45

Nota. Las necesidades diarias no son las mismas para todos los días de los meses en los que va a permanecer el maíz en la parcela, si no que depende de la etapa del ciclo vegetativo en que se encuentre. Fuente: Ortega y Diez (2013).

El cultivo de maíz tiene su máxima evapotranspiración en el periodo de la tercera etapa, con una cantidad de 6,89 mm de agua/día. Este es el máximo consumo de agua que va hacer la planta de maíz a lo largo de su ciclo vegetativo, y que corresponde a la cosecha que se encuentra centrada en la época estival como era lógico prever.

Para el cálculo de las necesidades totales de agua de riego: Hay que tener en cuenta que no toda la cantidad de agua que se aplica en la parcela de riego es aprovechada por la planta. Una parte de esa agua se pierde por escorrentía en la superficie, o por penetración en profundidad fuera del alcance de las raíces y no es aprovechable por la planta. Por esta razón, ha de conocerse la cantidad total de agua a aportar en el riego. Esto depende principalmente del sistema de riego empleado, aplicando un factor de corrección en función del procedimiento de riego. Se considera como factor de corrección, incrementar en un 10% con respecto a la cantidad determinada anteriormente (Ortega y Diez, 2013).

$$Q_{\text{totales}} = Q_{\text{diarias}} + 10 \% \times Q_{\text{diarias}} \quad (6)$$

$$Q_{totales} = 6.89 + 10 \% \times 6.89 = 7.58 \text{ lt/ m}^2/\text{día}$$

Donde:

$Q_{totales}$: Necesidades totales de agua de riego

$Q_{diarias}$: Necesidades diarias de agua de riego

Se debe aportar, 7.58 lt/m²/día que corresponde con las necesidades totales de agua para el maíz en la parcela, para garantizar el aporte de agua en todo momento y en base a este parámetro se debe diseñar y dimensionar el sistema de riego. La parcela cuenta con un área de 10 000 m² (01 hectárea), la demanda hídrica es de 75.8 m³/día para la máxima evapotranspiración en el periodo de la tercera etapa (floración y la formación del fruto, hasta la maduración).

4.2.2 Resultados demanda de energía

Cuando se conocen las variaciones de nivel que se producen durante el bombeo (abatimiento), no será necesario realizar el experimento de prueba de bombeo que también se indica en el pliego de condiciones técnicas del IDAE, quedando el cálculo de la altura total equivalente (H_{TE}), considerando pérdidas por fricción del 10% (Herrera y Vera, 2020; Pareja, 2016). Para el sistema de bombeo se ha considerado una altura de abatimiento de 1 m para todos los meses del año. Así mismo según IDAE (2009), la altura H_{TE} , es la distancia que tiene que recorrer el flujo de agua desde donde se extrae hasta el tanque de distribución.

Para el proyecto no se ha considerado un tanque de almacenamiento ($h_D = 0$) motivo que el riego no va hacer todos los días, y se realizará en horas de sol. Además el almacenamiento hídrico encarece el proyecto y mucho más costoso el almacenamiento de energía a través de baterías. Para el esquema propuesto la altura H_{TE} , se determina con la Ecuación (7). Resultando una altura equivalente de 46.20 m.

$$H_{TE} = [(h_{ST} + h_{abat}) + h_I + h_D] \times 1.1$$

(7)

$$H_{TE} = [h_{DT} + h_I + h_D] \times 1.1$$

Donde:

h_D : Altura del tanque

h_{ST} : Altura estática

h_{DT} : Altura dinámica

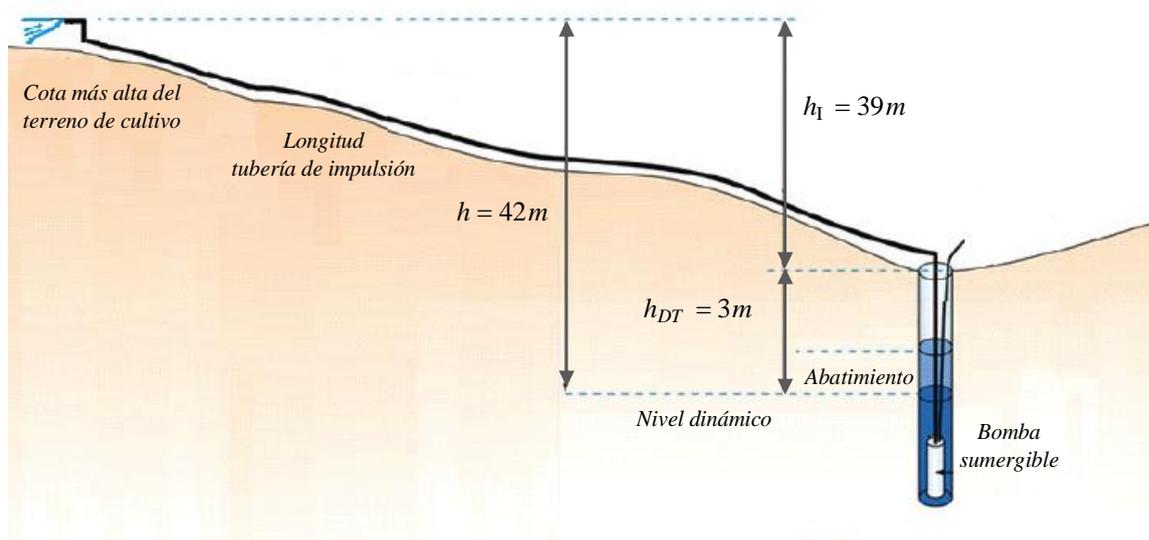
h_I : Altura de impulsión.

h_{abat} : Abatimiento.

En zona de estudio existe un pozo de 1.40 de diámetro y 5 m de profundidad para filtrar el agua. El nivel del agua podría mantenerse a una profundidad de 2 m de la cota del terreno, la cual equivaldría a la altura estática. Además, existe un desnivel de 39 m entre el nivel de terreno (instalación electrobomba) y la cota más alta del terreno de cultivo. Para el diseño la altura de abatimiento se consideró 1 m por debajo del nivel del agua, ya que en tiempos de estiaje podría disminuir el caudal; en cuanto a la tubería de impulsión se logró determinar 200 m de recorrido aproximadamente hasta el punto más alto. La Figura 6, muestra el esquema de las alturas manométricas para el sistema de bombeo fotovoltaico propuesto.

Figura 6

Esquema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola



[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

Determinado las necesidades hídricas para el cultivo maíz durante todo el ciclo vegetativo, y las alturas manométricas para abastecer las necesidades de agua. Según Pareja (2016) la energía hidráulica se determinó con la Ecuación (8).

$$E_H = \frac{\rho \times g \times Q \times H_{TE}}{3600} \quad (8)$$

Donde:

E_H : Energía hidráulica (Wh/día)

ρ : Densidad del agua (kg/m³)

g : Gravedad (m/s²)

Q : Volumen de agua (m³/día).

La energía hidráulica para dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico, incluido pérdidas del 10 %, se determinó con la Ecuación (8), resultó 9.54kWh/día, esta energía es la misma para todos los meses del año, la demanda hídrica y la altura de abatimiento también se consideró constante durante el año.

$$E_H = \frac{\rho \times g \times Q \times H_{TE}}{3600} = \frac{1000 \times 9.81 \times 75.80 \times 46.20}{3600}$$

$$E_H = 9.54 \text{ kWh/día}$$

4.3 Resultados de dimensionamiento del sistema de bombeo

4.3.1 Resultados mes más desfavorable

Para calcular el mes de dimensionado, será aquel en el cual el coeficiente entre la energía hidráulica calculada y la radiación para el ángulo óptimo calculado de 7,44° presente el mayor valor. En la Tabla 4, se presentan los cálculos para determinar el mes

más desfavorable. Así mismo muestra la radiación solar disponible para una inclinación del generador que optimiza la relación entre la demanda y la oferta de energía.

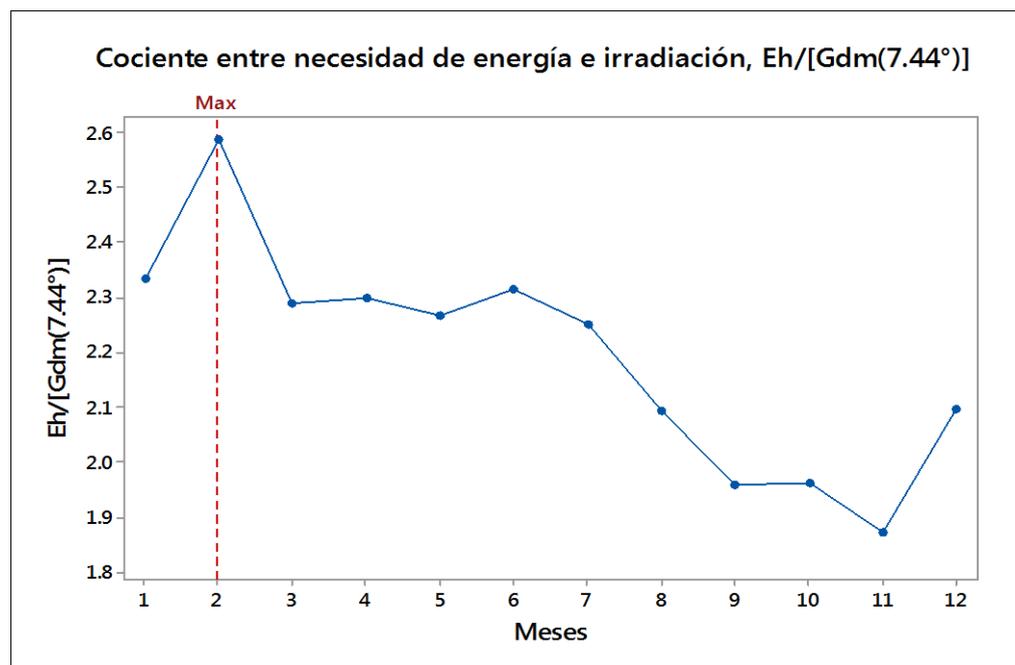
Tabla 4

Cálculo del cociente entre necesidad de energía e irradiación

Mes	Necesidad energía, E_h (kWh/día)	Irradiación, $G_{dm}(7.44^\circ)$ (kWh/día)	$E_h/G_{dm}(7.44^\circ)$
Ene	9.54	4.09	2.333
Feb	9.54	3.69	2.585
Mar	9.54	4.17	2.290
Apr	9.54	4.15	2.298
May	9.54	4.21	2.265
Jun	9.54	4.12	2.314
Jul	9.54	4.24	2.250
Ago	9.54	4.56	2.093
Sep	9.54	4.87	1.958
Oct	9.54	4.87	1.961
Nov	9.54	5.10	1.871
Dic	9.54	4.56	2.095

Figura 7

Comportamiento del cociente entre necesidad de energía e irradiación



[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

Asimismo, en la Figura 7, se muestra el comportamiento, y el valor máximo del cociente entre necesidad de energía e irradiación $E_h/G_{dm}(7.44^\circ)$, que equivale a 2.585. Por tanto se concluye que el mes de dimensionado es febrero, ángulo de inclinación óptimo 7.44° , y una demanda de energía hidráulica de 9.54 kWh/día.

4.3.2 Resultados energía eléctrica necesaria

Para el cálculo de energía eléctrica necesaria, el rendimiento pico del subsistema motor-bomba (suele tomar un valor medio de rendimiento del 40 % y un valor pico del 60 %) para corriente alterna (Pareja, 2016). Además, para los sistemas de bombeo de CA, la eficiencia de la motobomba es un parámetro comúnmente incluido en la eficiencia del conjunto inversor- motobomba. Por lo general, el fabricante proporciona herramientas gráficas para calcular el rendimiento global del sistema, incluida la matriz fotovoltaica. Por defecto, puede utilizarse un rendimiento típico de 40 % para bombas superiores a 500 W (IDAE, 2009).

Por otra parte los motores de CA, pueden ser monofásicos o trifásicos dependiendo de su potencia, tienen un factor de potencia que limita el uso de la corriente de suministro, lo que provoca pérdidas adicionales. Además, la utilización de dispositivos de acondicionamiento de potencia con función según el punto de máxima potencia para trasladar la mayor energía posible al motor, se sitúa entre el generador y el motor de la bomba y son siempre necesarios en el caso de que la bomba sea accionada por corriente alterna. Por tanto, la inclusión de estos equipos en el sistema implica pérdidas de potencia por autoconsumo (Alonso y Chenlo, 2005).

Según lo indicado por Pareja (2016), y IDAE (2009), para el cálculo de la energía necesaria de potencia máxima diaria se considera un rendimiento medio del 40 % , y se determinó con la Ecuación (9). Reemplazando, se obtiene como resultado 23.85 kWh/día.

$$E_{p \max-d} = \frac{E_H}{\eta_{MB}} \quad (9)$$

$$E_{p_{\max-d}} = \frac{E_H}{\eta_{MB}} = \frac{9.54}{0.40} = 23.85 \text{ kWh/día}$$

Donde:

$E_{p_{\max-d}}$: Energía eléctrica de potencia máxima (kWh/día).

E_H : Energía hidráulica diaria (kWh/día).

η_{MB} : Rendimiento medio del sistema motobomba.

Si el sistema funciona durante 3.69 hora aprovechables de sol en el mes más desfavorable, se calcula la potencia necesaria del motor (P_{mb}). Reemplazando en la Ecuación (10), se obtiene como resultado 6.46 kW.

$$P_{mb} = \frac{E_{p_{\max-d}}}{HSP} \quad (10)$$

$$P_{mb} = \frac{E_{p_{\max-d}}}{HSP} = \frac{23.85}{3.69} = 6.46 \text{ kW}$$

Donde:

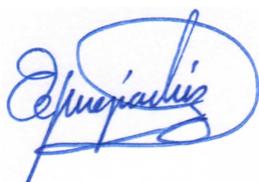
P_{mb} : Potencia eléctrica del motor (kW).

4.3.3 Resultados de potencia del generador fotovoltaico

Según Pareja (2016), la potencia del generador, sin tener en cuenta la potencia de cada módulo fotovoltaico, se realiza con la Ecuación (11). La potencia del generador será considerando un factor de seguridad de sobredimensionamiento de 10 %, se consideró 3.69 HSP para el mes más desfavorable (febrero) y un ángulo de inclinación óptimo de 7.44°.

$$P_{GFV} = FS \times \frac{E_{p_{\max-d}}}{0.9 \times HSP \times K_T} \quad (11)$$

Donde:





P_{GFV} : Potencia del generador (kW).

FS : Factor de seguridad para sobre dimensionar la instalación.

$E_{p\max-d}$: Energía eléctrica de potencia máxima (kWh/día).

HSP : Horas pico solar.

K_T : Pérdidas de la instalación.

Según Calero (2017) para bombeo directo donde no se utilizan baterías, el valor de K_T se toma 0.8. La bomba debe ser capaz de soportar un caudal pico (en litros/segundo) a partir de la potencia del generador, el rendimiento pico del subsistema motor-bomba que fue usado anteriormente y correspondiente al de la bomba). Asimismo según IDAE (2009), para bombeo directo en donde se utiliza inversor sin baterías, el valor de K_T es de 0.7. Si se trata de un sistema con baterías, se tomará el valor de 0.6.

Reemplazando valores en la Ecuación (11), se obtiene la potencia mínima a considerar para el generador fotovoltaico (11.28 kW).

$$P_{GFV} = FS \times \frac{E_{p\max-d}}{0.9 \times HSP \times K_T} = 1.1 \times \frac{23.85}{0.9 \times 3.69 \times 0.7}$$

$$P_{GFV} = 11.28 \text{ kW}$$

4.3.4 Resultados caudal pico de la bomba

La bomba debe ser capaz de soportar un caudal pico (l/s) a partir de la potencia del generador, el rendimiento pico del subsistema motor-bomba (suele tomar un valor medio de rendimiento del 40 % y un valor pico del 60 %). Según Pareja (2016) los cálculos se realizan con la Ecuación (12).

$$Q_{Pico} = \frac{P_{GFV} \times \eta_{P-MB}}{g \times H_{TE}} \quad (12)$$

Donde:

Q_{Pico} : Caudal pico (l/s)

P_{GFV} : Potencia del generador (kW).

η_{P-MB} : Rendimiento pico del subsistema motor-bomba.

g : Gravedad (9,81 m/s).

H_{TE} : Altura total equivalente (m).

Ahora, reemplazando valores en la Ecuación (12), se obtiene el caudal pico que debe soportar la bomba (13.58 l/s), que equivale a 48.89 m³/h.

$$Q_{Pico} = \frac{P_{GFV} \times \eta_{P-MB}}{g \times H_{TE}} = \frac{10.26 \times 0.6}{9.81 \times 46.20} = 13.58 \text{ l/s}$$

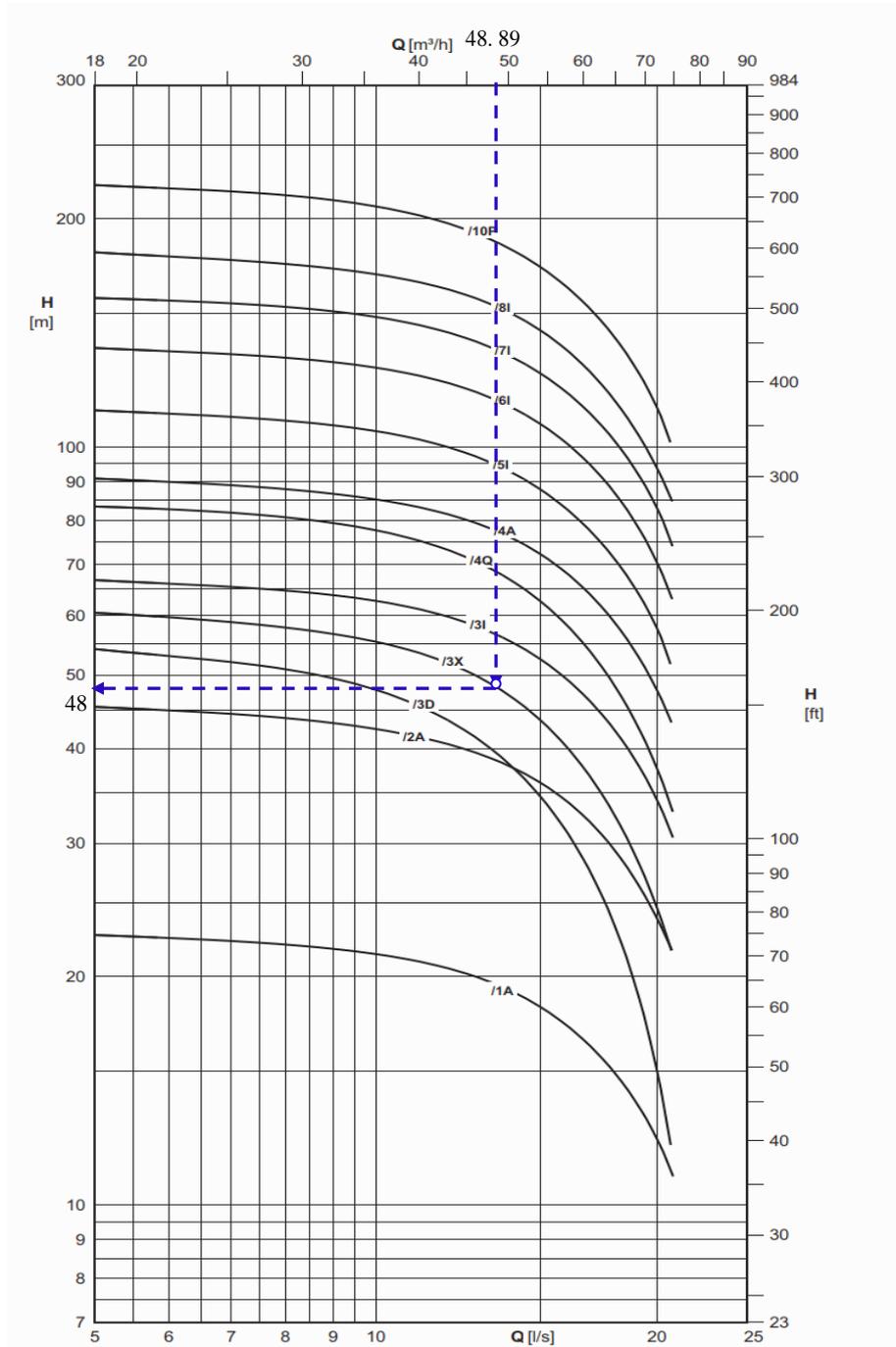
4.3.5 Resultados selección y justificación de la bomba

Se seleccionó una electrobomba Caprari tipo E6SX55/3X+MACW612A, pudiendo dar una potencia de hasta 9.2 kW, 380 V CA. Tomando un caudal pico de 48.89 m³/h se puede disponer de una altura de 48 m, un valor mayor a los datos de diseño. Por lo tanto la bomba es capaz de soportar el caudal pico (Figura 8).

También se verifica en la Figura 8, que las electrobombas E6SX55/2A+MACW610A, E6SX55/2A+MACW610A, y E6SX55/3D+MACW610A de 7.5 kW cumple con el requerimiento de potencia, pero no cumple con la altura máxima, para el caudal pico calculado.

Figura 8

Curva de funcionamiento bomba Caprari E6SX55/3X+MACW612A



Nota. Muestra la curva de funcionamiento para la bomba mas adecuada y que soporta el caudal pico calculado. Fuente: Catálogo Caprari.

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

4.3.6 Resultados de selección y justificación del sistema de potencia

Según Mejía (2019), la potencia del inversor o convertidor de frecuencia se determinó con la Ecuación (13). Resultando una potencia del inversor de 11.04 kW.

$$P_{Inv} = P_{carga} \times F.S \quad (13)$$

$$P_{Inv} = P_{carga} \times F.S = 9.2 \times 1.2 = 11.04 \text{ kW}$$

Donde:

P_{Inv} : Potencia del inversor.

P_{carga} : Potencia de la carga

$F.S$: Factor de seguridad (20 %).

La potencia mínima que debe soportar el inversor o convertidor de frecuencia es la potencia de la carga, por el arranque de la electrobomba se ha considerado un factor de seguridad de 20 %. De acuerdo a marcas de fabricantes y rangos de potencias disponibles en el mercado se ha seleccionado, un inversor de bombeo solar Hober HSPL11KHA/B, que puede entregar hasta 11 kW, rango de voltaje de entrada en corriente continua: 500-750V CD, y salida: 380V CA-3 fases.

El variador de frecuencia para bombeo solar tiene muchas funciones específicas de control solar y de bomba, como el seguimiento del punto de potencia máximo incorporado. El seguimiento del punto de potencia máximo (MPPT) le asegura obtener la mejor potencia de salida posible de su panel solar y maximiza el rendimiento de su bomba a lo largo del día.

4.3.7 Resultados selección y justificación sistema generación fotovoltaica

La potencia calculada para el generador fotovoltaico fue de 11.28 kW, se ha considerado un arreglo fotovoltaico de 2 en paralelo y 12 paneles en serie. El panel fotovoltaico seleccionado corresponde a un modelo SpolarPV SP470M6-96 de 470 Wp, y 48 V del tipo monocristalino, aportando una potencia pico total de 11.28 kWp al generador, suficiente para suplir la demanda de energía. Pareja (2016) indica que para el cálculo del número de paneles fotovoltaicos totales se realiza con la Ecuación (14).

$$N_{p-total} \geq \frac{P_{GFV}}{P_{max p}} \quad (14)$$

Donde:

$N_{p-total}$: Número total de paneles fotovoltaicos.

$P_{max p}$: Potencia máxima de la bomba.

$$N_{p-total} \geq \frac{P_{GFV}}{P_{max p}} = \frac{11.28}{0.470} = 24 \text{ paneles}$$

Se ha tomado un voltaje nominal del sistema de generación de 576 V DC, tomando en cuenta el rango de voltajes de entrada del inversor de bombeo solar Hober: 500-750V CD.

Según Mejía (2019), la corriente de operación del generador fotovoltaico se calcula con la Ecuación (15). Resultando 18.16 A.

$$I_{oper,G} = I_{oper,P} \times N_{P,p} \quad (15)$$

$$I_{oper,G} = 9.08 \times 2 = 18.16 \text{ A}$$

Donde:

$I_{oper,G}$: Corriente de operación del generador fotovoltaico

$I_{oper,P}$: Corriente de operación del panel

$N_{P,p}$: Número de paneles en paralelo

Además Mejía (2019), para determinar la corriente máxima de todo el conjunto de generadores fotovoltaicos, se tiene que tomar la corriente de corto circuito del panel seleccionado, y el número de paneles en paralelo. Resultando 19.75 A, valor que sirve para la selección de los equipos de protección eléctrica (fusibles y termo magnéticos) en el tramo generador fotovoltaico e inversor, el cálculo se realizó con la Ecuación (16).

$$I_{max,G} = I_{SC,G} = I_{SC,p} \times N_{P,p} \quad (16)$$

$$I_{max,G} = I_{SC,G} = 9.75 \times 2 = 19.5 \text{ A}$$

Donde:

$I_{max,G}$: Corriente máxima del generador fotovoltaico

$I_{SC,G}$: Corriente de corto circuito del generador fotovoltaico

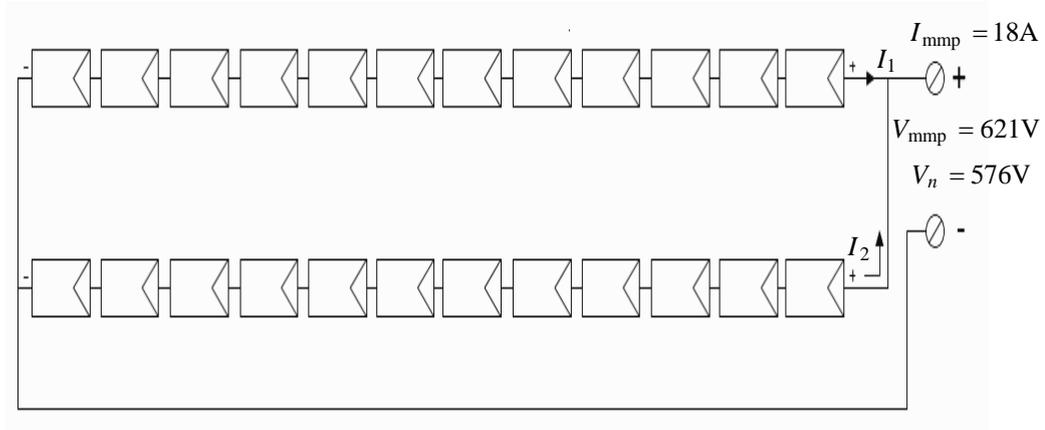
$I_{SC,p}$: Corriente de corto circuito del panel

$N_{P,p}$: Número de paneles en paralelo.

La Figura 9, muestra la configuración del campo solar dimensionado (2x12), panel SpolarPV SP470M6-96, con un voltaje nominal de 576 V, y voltaje de máxima potencia 621 V.

Figura 9

Configuración del campo solar dimensionado (2x12), panel SpolarPV SP470M6-96

**4.3.8 Resultados de cálculo de Conductores**

Para determinar la sección del conductor en cada tramo del sistema de bombeo fotovoltaico se utilizó las Ecuaciones (17) y (18). Resultados se muestran en la Tabla 5.

$$S = \frac{2 \times \rho \times L \times I}{\Delta V} \quad (17)$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \times \rho \times L \times I \times \cos \phi}{\Delta V} \quad (18)$$

Donde:

S : Sección conductor (mm^2)

ρ : Conductividad del material ($\rho_{\text{Cu } 75^\circ\text{C}} = 0.022 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$).

ΔV : Caída de tensión (V)

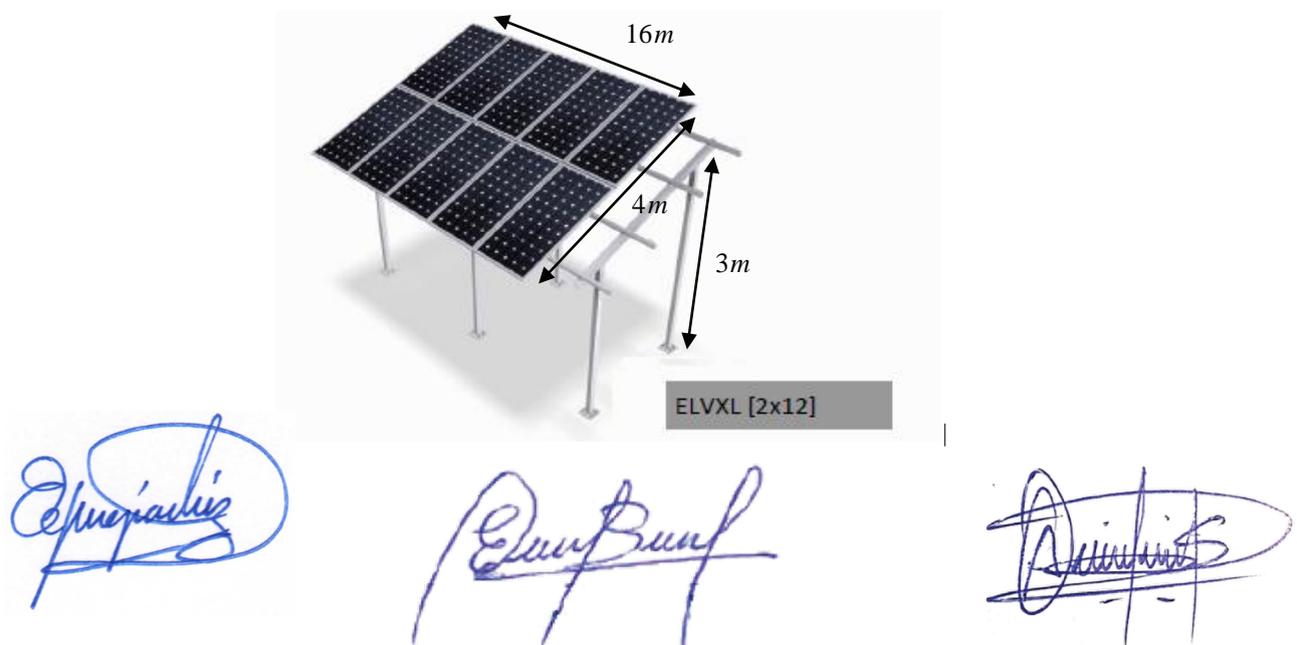
Tabla 5*Calculo de conductores del sistema de bombeo fotovoltaico*

Componentes	Longitud (m)	Máxima caída de tensión admisible	I (A)	Vn	S (mm ²)	AWG
Generador -Inversor	30	3%	18.00	576	1.38	14
Inversor - Bomba	40	3%	18.64	380	2.24	12

4.3.9 Sistemas de puesta a tierra

Instalaciones con tensiones nominales a superiores a 48 voltios, se debe disponer de una toma a tierra, que estará conectada como mínimo a la estructura del campo generador y a los marcos metálicos de los módulos fotovoltaicos (Pareja, 2016) . Para la investigación se considera una puesta a tierra que cumpla con la especificación del Código Nacional de Electricidad (CNE): Varilla de cobre 5/8 pulgada x 2.40 metros, conector de cobre tipo AB, caja de registro de concreto, y conductor de cobre 16 mm. La resistencia de puesta tierra se recomienda menor a 25Ω , se recomienda utilizar dosis de bentonita.

4.3.10 Estructura de soporte de los paneles fotovoltaicos.

Figura 10*Estructura de soporte elevada, disposición de los módulos vertical [2x12]*

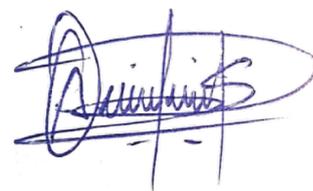
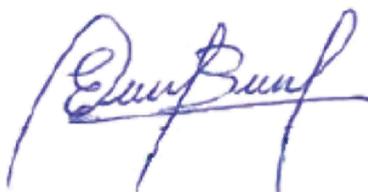
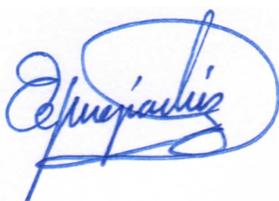
La configuración de la estructura de soporte será elevada, disposición de los módulos vertical [2x12] (Modulo: 1956x1310 mm), con inclinación de 5°-25° de 3m de altura (Figura 10).

4.3.11 Sistema de almacenamiento

Almacenar agua en un tanque elevado es mucho más económico que almacenar energía en baterías. El almacenamiento de la batería es razonable solo cuando es necesario regar por la noche y el rendimiento máximo del pozo es insuficiente para satisfacer la demanda de agua en los días soleados. (Herrera y Vera, 2020; Pareja, 2016).

Además, la capacidad de almacenamiento de agua es importante en un sistema de bombeo, almacenamiento de dos a cinco días puede ser necesario, dependiendo del clima y patrón de uso del agua. Almacenamiento de agua en tanques tiene sus inconvenientes. Evaporación considerable, pueden ocurrir pérdidas si el agua se almacena en tanques abiertos, mientras que los tanques cerrados son lo suficientemente grandes para almacenar el suministro de agua para varios días puede ser costoso (Eker, 2005).

Con la finalidad de no encarecer los costos del proyecto para su implementación. Este sistema está diseñado para bombear agua solo durante el día. La cantidad de agua bombeada depende totalmente de la cantidad de luz solar que llega a los paneles fotovoltaicos y del tipo de bomba. Debido a que la intensidad del sol y el ángulo en el que incide sobre el panel fotovoltaico cambia a lo largo del día, la cantidad de agua bombeada por este sistema también cambia durante todo el día. Por ejemplo, durante los períodos óptimos de radiación (desde el final de la mañana hasta el final de la tarde en los días soleados), la bomba funciona con una eficiencia del 100 % o cerca de ella con el máximo flujo de agua. Sin embargo, durante las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde, la eficiencia de la bomba disminuirá aún más. Para compensar estos caudales variables, es necesaria una buena combinación entre la bomba y los módulos fotovoltaicos para lograr un funcionamiento eficiente del sistema. Según Castro et al. (2011) en caso se quisiera determinar el volumen de almacenamiento, se puede realizar con la Ecuación (19).



$$V_a = Q \cdot D_a \quad (19)$$

Donde:

V_a : Volumen de almacenamiento (m^3)

Q : Caudal ($m^3/día$)

D_a : Días de autonomía

4.3.12 Resumen de resultados del cálculo teórico

En la Tabla 6, se muestra los resultados de cálculos de variables hidráulicas del sistema de bombeo fotovoltaico. Así mismo la Tabla 7, muestra el resumen de cálculos de producción energética.

Tabla 6

Variables hidráulicas del sistema de bombeo fotovoltaico

Variable	Unidad	Valor calculado
Altura manométrica (H)	m	42.00
Perdidas 10% (Hp)	m	4.20
Caudal (Q)	m^3/h	20.54
Caudal normalizado	$(m^3/h)/kWp$	20.54

Tabla 7

Resumen de cálculos de producción energética sistema de bombeo fotovoltaico

Variable	Unidad	Valor calculado
Potencia pico generación SFV	kWp	11.28
Potencia nominal de generación SFV	kWp	11
Energía CA en la entrada del motor (E1)	kWh	23.85
Energía mecánica salida del motor (E2)	kWh	19.08
Energía hidráulica	kWh	9.54

Producción energía CA en la entrada del motor (E1)	kWh/kWp	2.17
Producción energía mecánica salida del motor (E2)	kWh/kWp	1.73
Producción energía hidráulica (EH)	kWh/kWp	0.87

En la Tabla 8, muestra el resumen de componentes del sistema de bombeo fotovoltaico dimensionado.

Tabla 8

Resumen de componentes del sistema de bombeo fotovoltaico dimensionado.

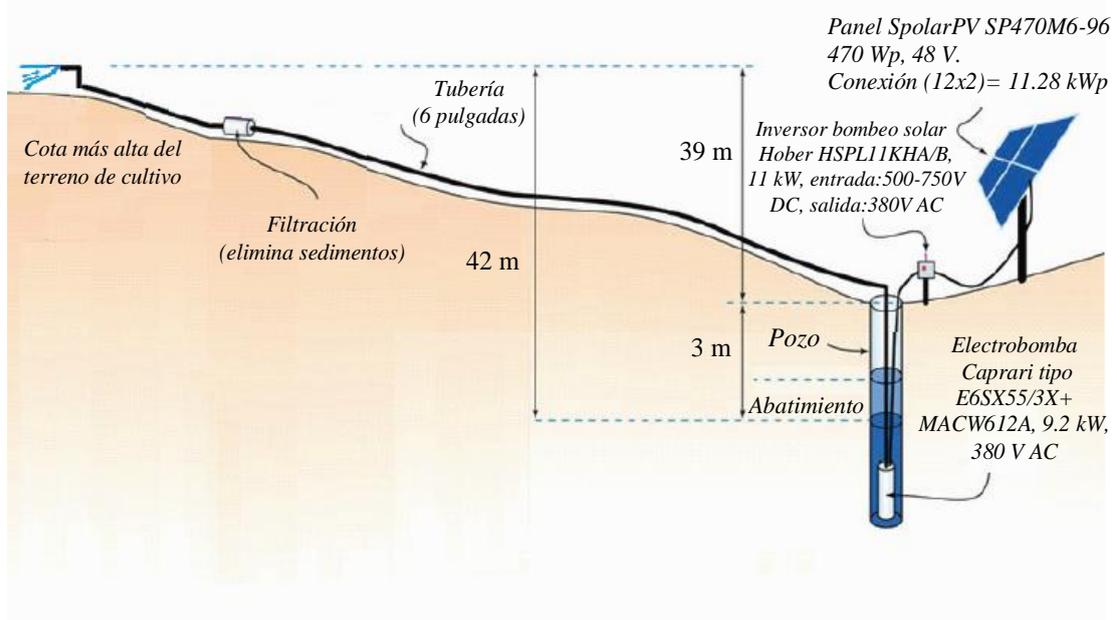
N°	Descripción de componentes	Características	Unidad	Cantidad
1.1	Panel fotovoltaico	Mono cristalino SpolarPV SP470M6-96 de 470 Wp, 48. Conexión [2x12]	Und	24
1.2	Inversor	Hober HSPL11KHA/B, 11 kW, rango de voltaje de entrada: 500-750V DC, y salida: 380V AC	Und	1
1.3	Caja de Protección	IP65	Und	1
1.4	Porta fusibles	20 y 25 A	Und	2
1.5	Termo magnético trifásico	25 A	Und	1
1.6	Interruptor diferencial trifásico	25A, corriente residual nominal 30 mA	Und	1
1.7	Cable 14 AWG	CENTElsa Fotovoltaico PV XLPE 2000 V 90°C SR, 14 AWG	m	30
1.8	Cable 12 AWG	CENTElsa Fotovoltaico PV XLPE 2000 V 90°C SR, 12 AWG	m	40
1.9	Electrobomba	Caprari tipo E6SX55/3X+MACW612A, 9.2 kW, 380 V CA	Und	1
1.10	Tubería	Flexible 6", con terminales de expansión y empalmes inoxidables	m	200
1.11	Estructura	Soporte elevada, disposición de módulos vertical [2x12] (Modulo: 1956x1310 mm), con inclinación de 5°-25°, 3m de altura.	Und	1
1.12	Puesta a tierra	Incluye 01 Varilla Cu 5/8"x2.40 m, 01 conector de Cu tipo AB 5/8", 01 caja de registro de concreto, 01 saco de bentonita 30 Kg, 10 m conductor Cu 16 mm ²	Und	1

4.3.13 Componentes y topología del sistema de bombeo fotovoltaico

La Figura 11, muestra cada componente y sus especificaciones técnicas del sistema fotovoltaico dimensionado.

Figura 11

Componentes y topología del sistema de bombeo fotovoltaico dimensionado



4.4 Resultados con herramienta de simulación fotovoltaica SISIFO

El SÍSIFO es una herramienta de simulación fotovoltaica que permite el uso de modelos para diseñar plantas de energía fotovoltaica, sistemas de riego fotovoltaico y sistemas conectados a la red, y muestra los resultados con el objetivo de asegurar su calidad y aumentar la eficiencia de sistemas fotovoltaicos. Para la simulación se utilizó la herramienta SISIFO, que permite seleccionar componentes del sistema de bombeo, y parámetros de balance de energía.

4.4.1 Datos de entrada y selección de equipos simulación en SISIFO

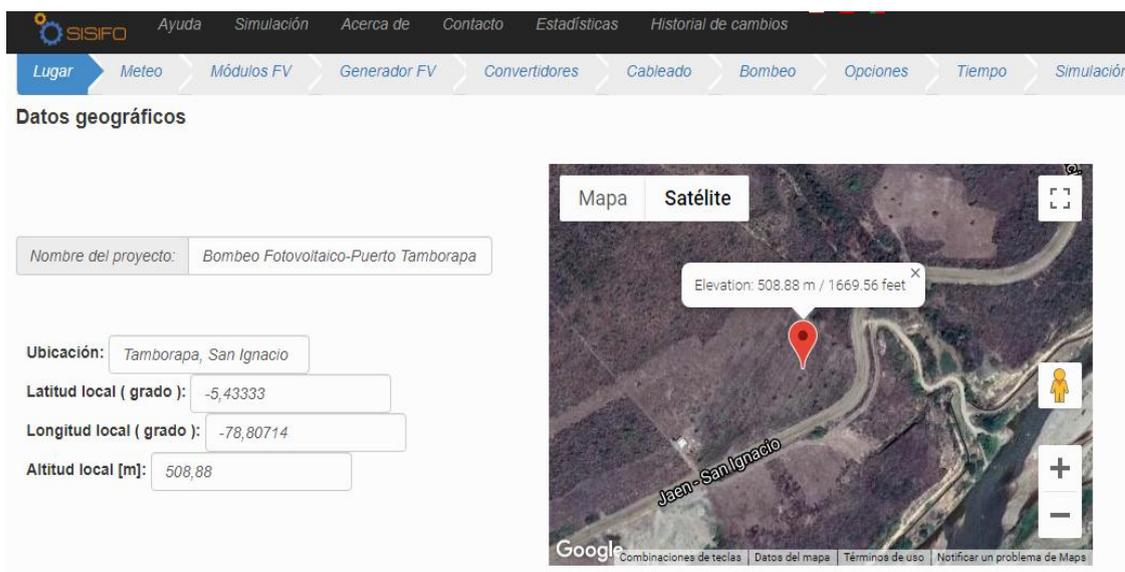
En la simulación se utilizó datos obtenidos en los cálculos teóricos anteriores:

- Latitud: -5.43
- Longitud: -78,81
- Orientación e inclinación: 7.44
- Potencia de diseño o potencia total del sistema: 11.28 kWp
- Altura manométrica: 46.20 m
- Caudal: 20.54 m³/h
- Módulos fotovoltaicos en serie: 12
- Módulos fotovoltaicos en paralelo :2

La interfaz de entrada (Figura 12) está compuesta por varias pestañas (Sitio, Datos Meteorológicos, Módulos FV, Generadores FV, Convertidores, Cableado, Bombeo, Opciones y Tiempo) que contienen los diferentes parámetros y opciones que debe introducir o seleccionar el usuario para realizar una simulación. Después de completar todas las entradas requeridas, el usuario comienza la simulación.

Figura 12

Interfaz de entrada de SISIFO



[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

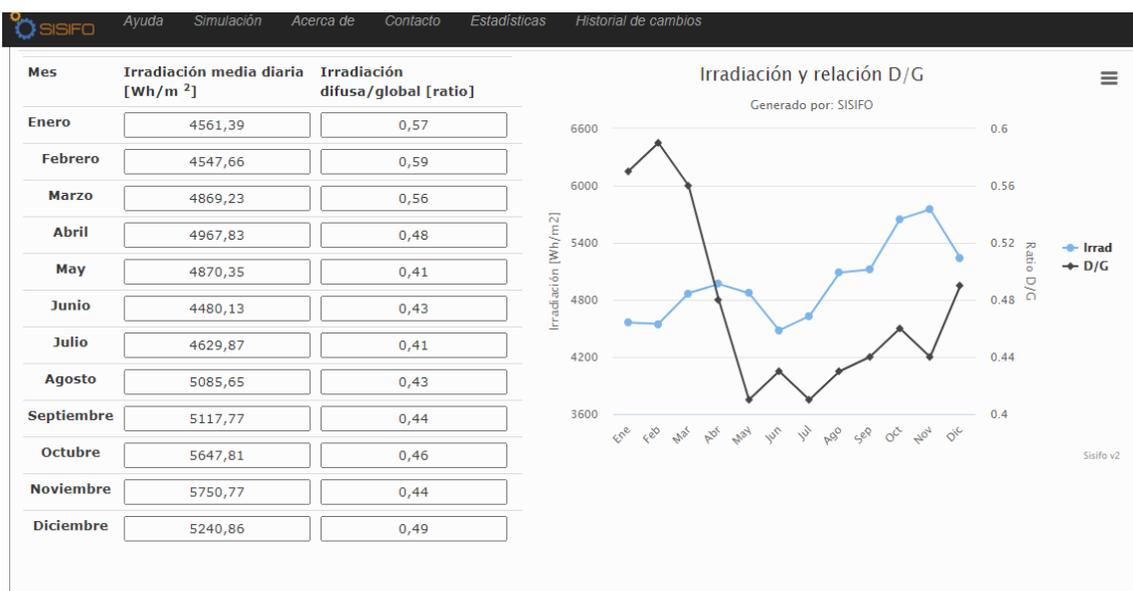
El SISIFO, permite seleccionar el tipo de datos que se utilizarán en la simulación, el tipo de datos meteorológicos más usados puede ser promedios mensuales.

Si la opción de tipo de dato seleccionado es promedios mensuales, el programa genera la serie de tiempo a partir de los 12 valores medios mensuales de la irradiación horizontal global diaria y las temperaturas ambiente máxima y mínima. La primera serie de tiempo se descarga automáticamente de la base de datos PVGIS o el usuario la introduce manualmente durante los doce meses del año (Figura 13). Además, la relación entre la irradiación difusa y la global también se puede descargar de PVGIS.

Para la simulación se consideró la data de irradiación del PVGIS que descarga el programa SISIFO, con la finalidad de comparar con datos de la NASA que se utilizó para los cálculos teóricos. Además, la Figura 14 muestra la pestaña de parámetros de entrada para los módulos fotovoltaicos. La Figura 15, permiten la selección de las características eléctricas y geométricas del generador fotovoltaico. Los primeros parámetros son las características eléctricas, que son las mismas para todos los generadores fotovoltaicos. Los dos últimos parámetros son el número de diodos de derivación en la dimensión horizontal y vertical, que se utilizan en el modelo de sombreado.

Figura 13

Datos meteorológicos- Irradiación diaria (media mensual)



[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

Figura 14*Datos de entrada módulos fotovoltaicos*
Figura 15*Parámetros generador fotovoltaico antes de seleccionar la estructura*

Luego, se selecciona la estructura más adecuada, entre las cuatro estructuras estáticas y las cinco de seguimiento solar disponibles para la simulación (Parámetro estructura). La Figura 16, muestra la selección de una estructura estática sobre piso o teja

que se seleccionó para la investigación. Estos parámetros son particulares para cada estructura (inclinación, separación entre estructuras, ángulos máximos de rotación, etc.).

Figura 16

Parámetros de la estructura

En la Figura 17, muestra la pestaña, que permite seleccionar las características eléctricas del inversor o convertidor de frecuencia, así como de los transformadores BT / MT, en caso el sistema lo tuviera.

Figura 17

Parámetros del Inversor

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

Figura 18

Busca de inversores/Variadores mas adecuados

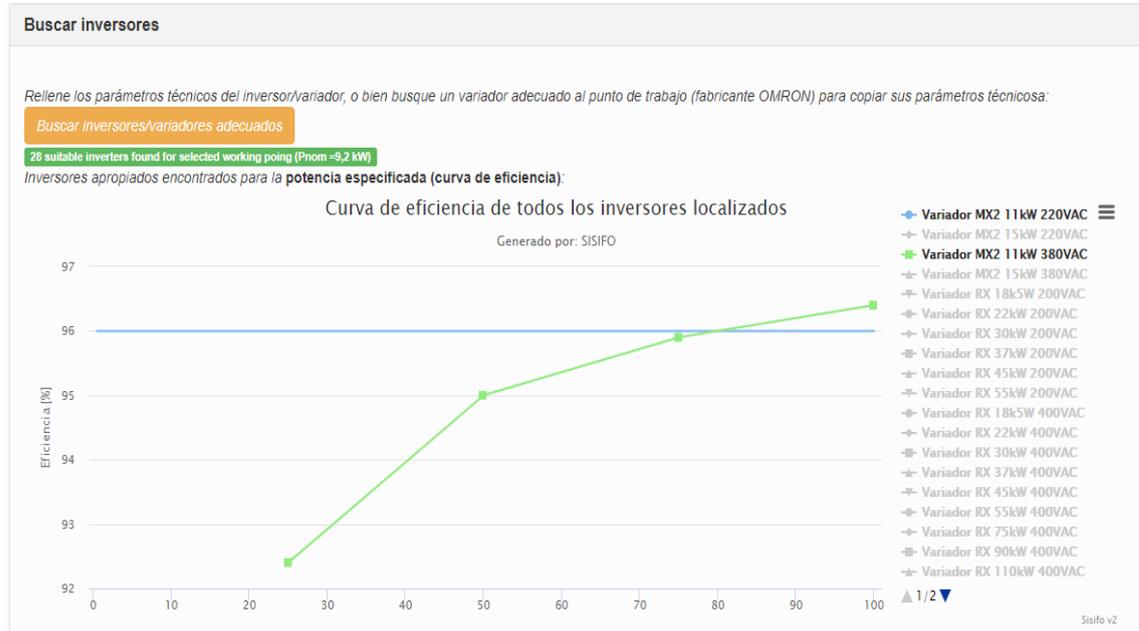
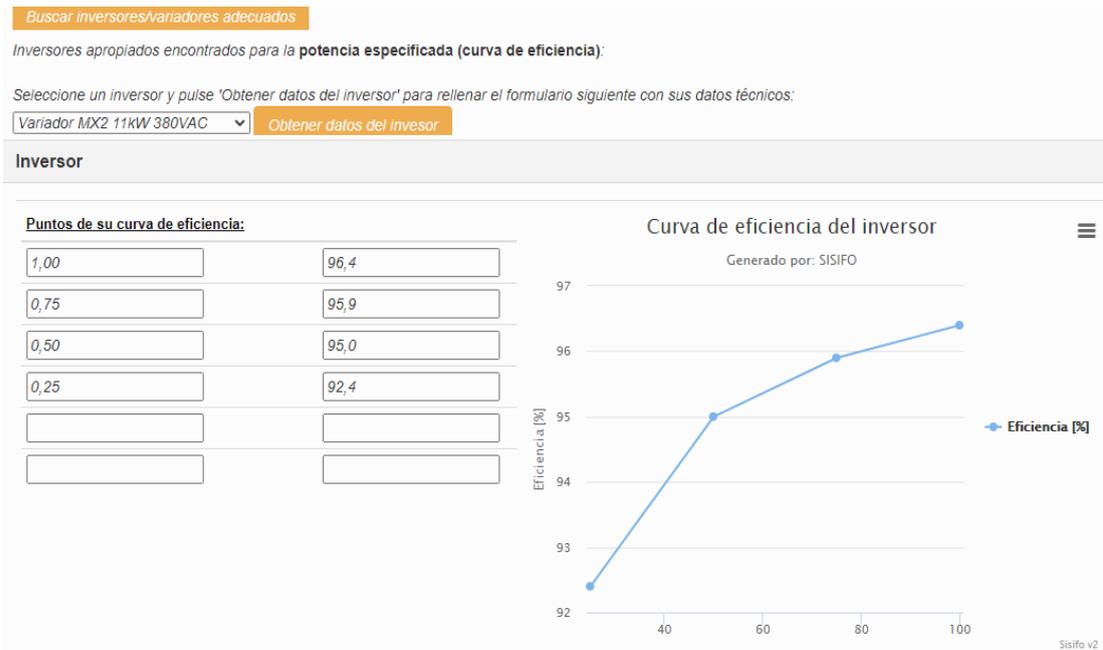


Figura 19

Selección del Inversor /Variador MX2 11 kW, 380 V CA adecuado



[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

Una vez definido los parámetros del inversor, permite al usuario optar por que la herramienta muestre solo los inversores o variadores de frecuencia adecuados. El SISIFO muestra las curvas de eficiencia del inversor, para que el usuario verifique su eficiencia para la potencia especificada (Figura 18, 19).

En la Figura 20, muestra la pestaña que contiene las pérdidas de cableado. Las pérdidas de cableado se indican en porcentaje de la potencia fotovoltaica nominal.

Figura 20

Cableado del sistema de bombeo

Simulación de aplicación FV: Expanda este panel para cargar/guardar un fichero o perfil

Bombeo de agua

Lugar > Meteo > Módulos FV > Generador FV > Convertidores > **Cableado** > Bombeo > Opciones > Tiempo > Simulación

Cableado

Cableado	
Pérdidas en el cableado DC entre el generador FV y el inversor (%):	<input type="text" value="1,0"/>
Pérdidas en el cableado AC entre el inversor y el transformador de MT (%):	<input type="text" value="3,0"/>
Pérdidas en el cableado AC entre los transformadores de MT y AT (%):	<input type="text" value="0,0"/>
Pérdidas en el cableado AC entre el transformador AT y el PPC (%):	<input type="text" value="0,0"/>

En la Figura 21, muestra la pestaña, que permite la selección de los parámetros de bombeo y solo es necesaria si se está simulando un sistema de bombeo. La herramienta de simulación SISIFO calcula la potencia de entrada al motor (P_1) de acuerdo con la potencia de entrada eléctrica disponible (PAC), así como la potencia del eje (P_2), la potencia hidráulica (PH), el caudal (Q), y la frecuencia de funcionamiento (ω) instantáneamente. Antes de estos cálculos es necesario obtener todos los parámetros de la curva necesarios para realizarlos.

Figura 21*Parametros del sistema de bombeo*

Bombeo

Tipo de sistema FV:

Tipo de bombeo:

System

System:

Hestática + Hpiscina [m]:

Hfricción + drawdown [m]:

Flujo de diseño [m3/h]:

Primer mes de riego:

Último mes de riego:

Líquido bombeado:

Densidad del líquido [Kg/m3]:

Una vez definido el punto de trabajo, este método de selección de bombas que implementó la herramienta SISIFO, permite al usuario optar por que la herramienta muestre solo las bombas con una pendiente alta, todas las bombas que funcionan en el punto de trabajo o solo modelos de bomba específicos introducidos por el usuario.

En cualquier caso, SISIFO muestra las curvas H-Q de las bombas mostradas para que el usuario verifique su pendiente y la posición relativa del punto de trabajo, también muestra otras curvas características de bombas como curvas P-Q, y Curvas de cada conjunto bomba – motor. Por lo tanto, desde la base del método de selección de bomba propuesto, es posible realizar un ajuste fino de la selección.

Figura 22

Curvas altura H-Caudal Q de las bombas encontradas

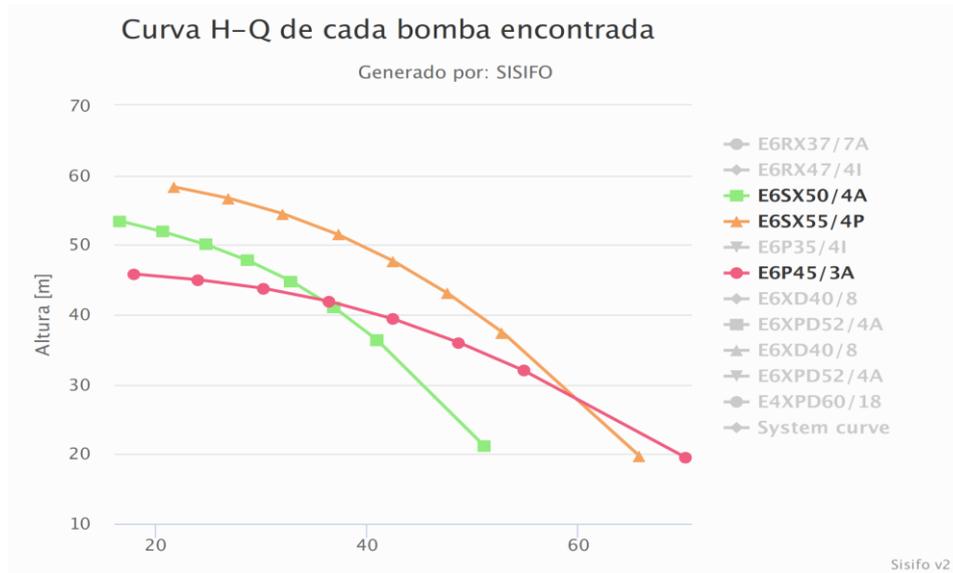
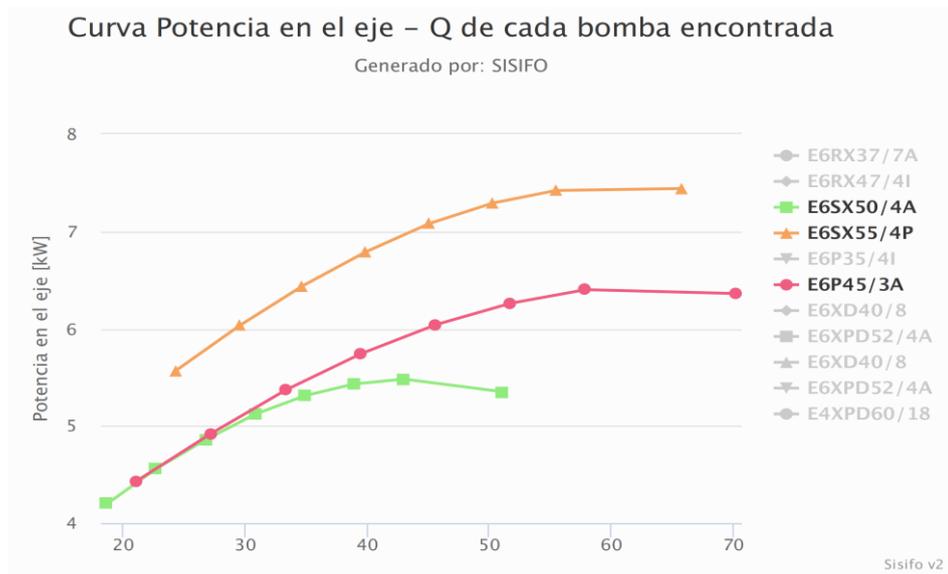


Figura 23

Curvas potencia en el eje P-Caudal Q de las bombas encontradas



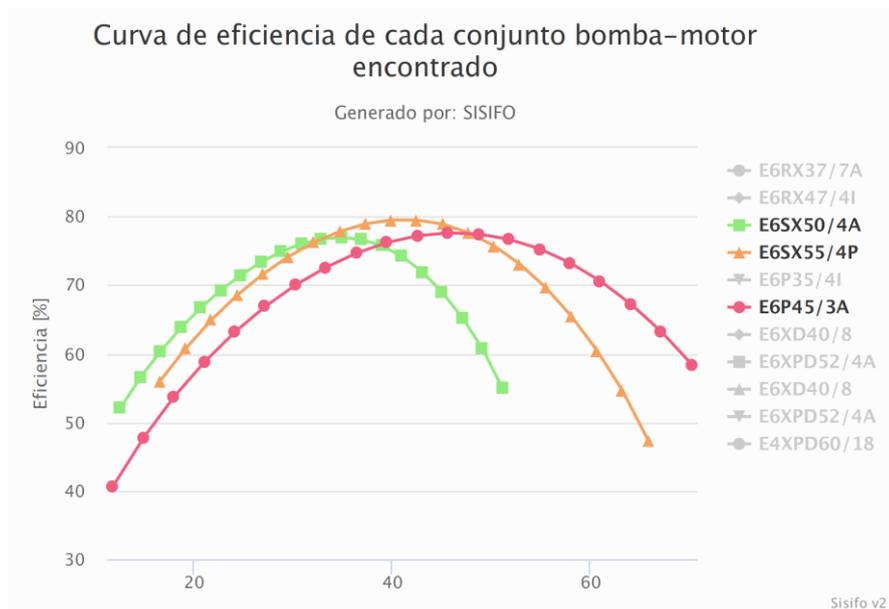
[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

Figura 24

Curvas de cada conjunto bomba – motor encontrado



Además, el SISIFO permite seleccionar el tipo de bomba más adecuada, y muestra las curvas características de la bomba, para que el usuario verifique su comportamiento (Figura 25, y 26).

Figura 25

Bomba E6SX55/4P+MACW610A-8V seleccionada

SISIFO Ayuda Simulación Acerca de Contacto Estadísticas Historial de cambios

Bomba:
Modelo:

Curva de la bomba		Curva de potencia en el eje	
Q [m3/h]:	H [m]	Q [m3/h]:	P2 [kW]
<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="62,73"/>	<input type="text" value="16,56"/>	<input type="text" value="4,80"/>
<input type="text" value="21,74"/>	<input type="text" value="58,32"/>	<input type="text" value="24,34"/>	<input type="text" value="5,57"/>
<input type="text" value="26,93"/>	<input type="text" value="56,69"/>	<input type="text" value="29,52"/>	<input type="text" value="6,03"/>
<input type="text" value="32,11"/>	<input type="text" value="54,44"/>	<input type="text" value="34,70"/>	<input type="text" value="6,44"/>
<input type="text" value="37,30"/>	<input type="text" value="51,46"/>	<input type="text" value="39,89"/>	<input type="text" value="6,79"/>
<input type="text" value="42,48"/>	<input type="text" value="47,68"/>	<input type="text" value="45,07"/>	<input type="text" value="7,08"/>
<input type="text" value="47,66"/>	<input type="text" value="43,00"/>	<input type="text" value="50,26"/>	<input type="text" value="7,29"/>
<input type="text" value="52,85"/>	<input type="text" value="37,39"/>	<input type="text" value="55,44"/>	<input type="text" value="7,42"/>
<input type="text" value="65,81"/>	<input type="text" value="19,62"/>	<input type="text" value="65,81"/>	<input type="text" value="7,44"/>

Figura 26

Curvas de la bomba E6SX55/4P+MACW610A-8V seleccionada

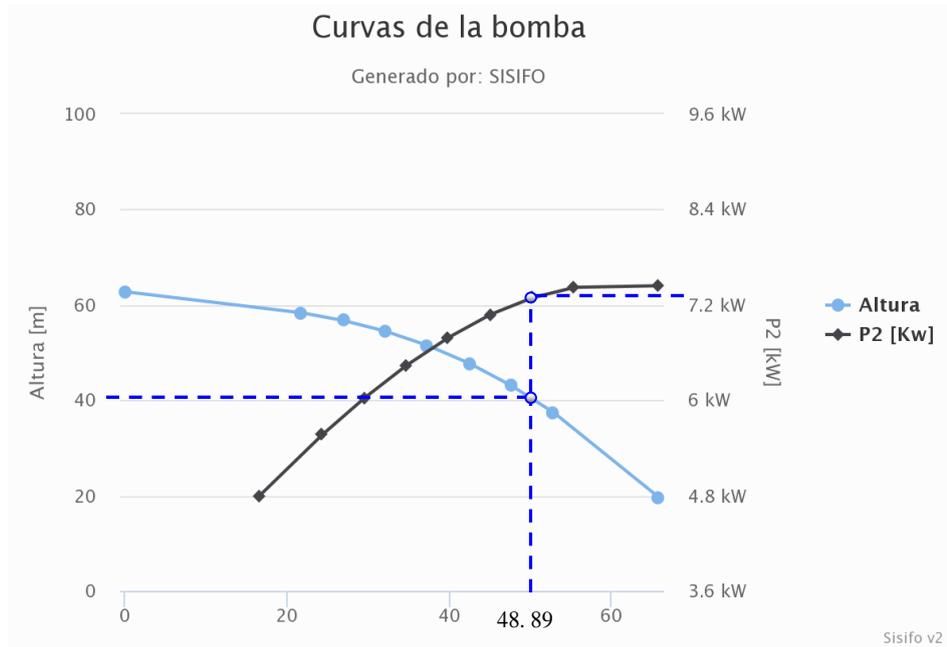


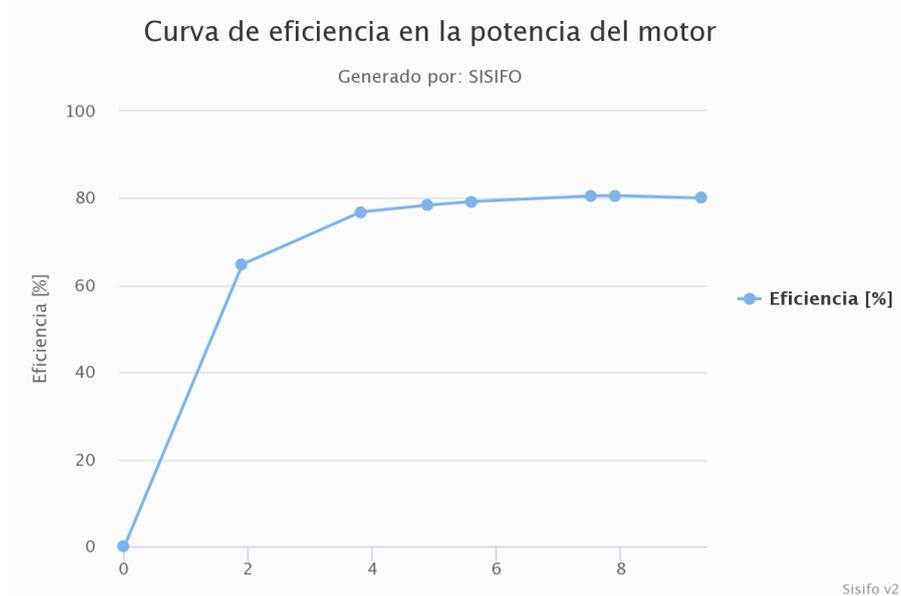
Figura 27

Motor MACW610/3A-8 seleccionado

Motor	
Motor de la bomba:	
Modelo:	MACW610/3A-8
Potencia nominal en el eje de la bomba [kW]:	7,5
Velocidad nominal utilizada para los parámetros de la bomba [rpm]:	2898,2
Velocidad mínima, relativa a la velocidad nominal, para suficiente refrigeración [%]:	60,0
Máxima velocidad, relativa a la velocidad nominal:	110,00
Frecuencia principal (Hz):	60
Voltaje nominal:	3x400

Figura 28

Curva de eficiencia del Motor MACW610/3A-8 seleccionado



La herramienta de simulación SISIFO, también permite seleccionar el tipo de motor de la bomba, y muestra las curvas de eficiencia en la potencia del motor, para que el usuario verifique comportamiento (Figura 27, y 28).

Figura 29

Simulación del sistema de bombeo

SISIFO Ayuda Simulación Acerca de Contacto Estadísticas Historial de cambios

Simulación de aplicación FV: Expanda este panel para cargar/guardar un fichero o perfil

Lugar > Meteo > Módulos FV > Generador FV > Convertidores > Cableado > Bombeo > Opciones > Tiempo > **Simulación** > Informe

Resultados de la simulación

Q 1-Simulación o N-Simulaciones combinadas en una ¡Simular!

- Una simulación simple
- N-Simular: modificar un parámetro de entrada (de un valor a otro, incrementando la cantidad que se indique)
- N-Simular: combinar varias -o todas- las bombas adecuadas del fabricante Caprari

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

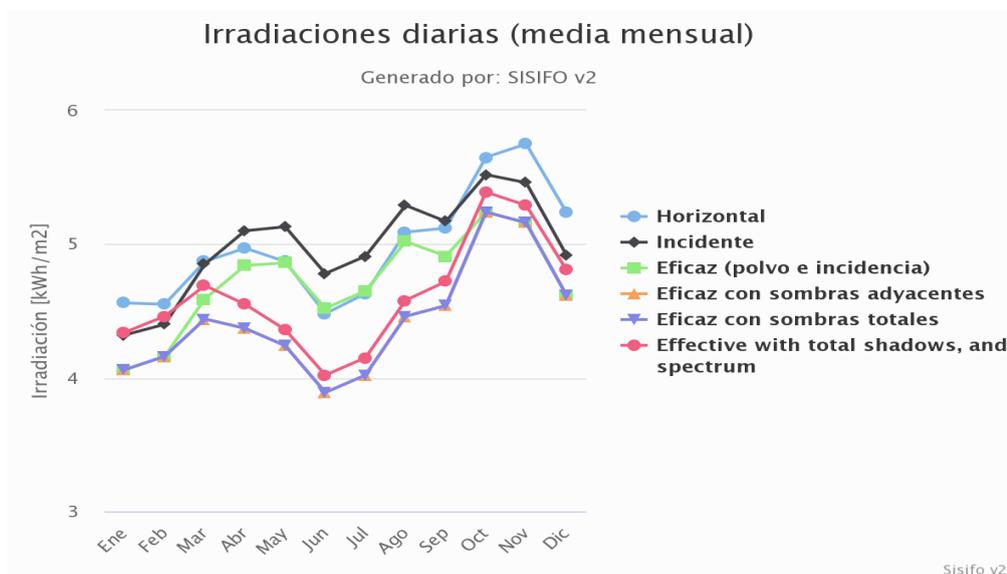
El programa también muestra la pestaña de tiempo de simulación, en minutos, que establece la resolución temporal de la simulación. En la Figura 29 se muestra la pestaña para realizar la simulación.

4.4.2 Resultados de simulación en SISIFO

En la Figura 30, se muestran los valores medios mensuales de irradiaciones diarias en kWh/m² horizontales e incidentes en el plano del generador fotovoltaico, efectivas (descontando polvo y pérdidas por incidencia), efectivas con sombra adyacente, efectivas con sombras totales, y efectivas con sombreado y espectro.

Figura 30

Irradiación diaria (media mensual)



En la Figura 31, se muestra la producción energética media mensual diaria, en kWh/kWp (12 valores). Así mismo, la Figura 32 muestra los rendimientos globales.

Figura 31

Producción energética diaria, plano horizontal

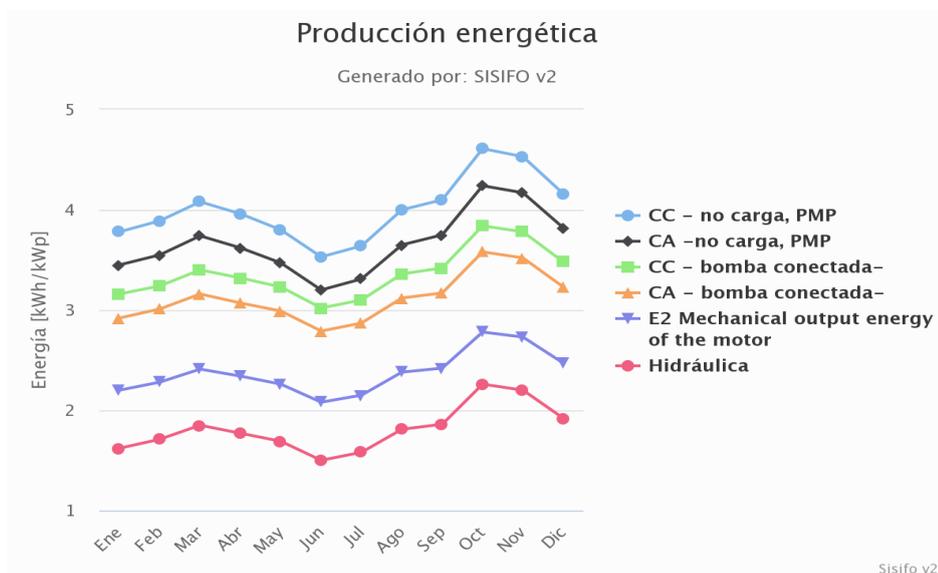
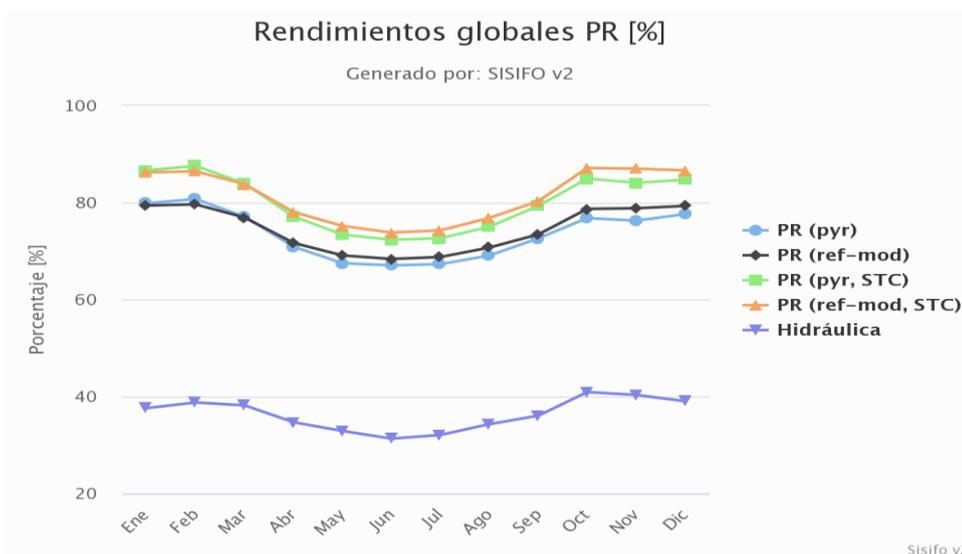


Figura 32

Rendimientos globales, plano horizontal



En la Tabla 9, y Figura 33, se muestra los resultados detallados de producción media mensual de energía, en kWh/kWp (12 valores). También se muestra la producción de bombeo diario, en (m³/h)/kWp (12 valores).

Tabla 9

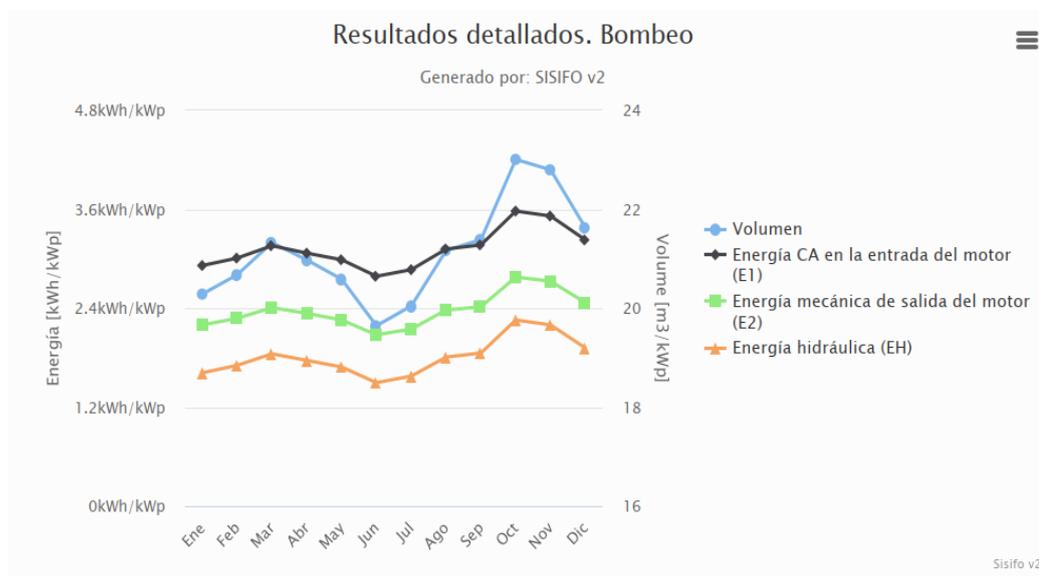
Resultados detallados de producción energética diaria, plano horizontal

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Volumen [m ³ /kWp]	20.29	20.68	21.33	20.98	20.59	19.65	20.05	21.17	21.39	23.01	22.8	21.63
Energía CA en la entrada del motor (E1) [kWh/kWp]	2.92	3.01	3.16	3.07	2.99	2.79	2.87	3.12	3.17	3.58	3.52	3.23
Energía mecánica salida del motor (E2) [kWh/kWp]	2.2	2.28	2.41	2.34	2.26	2.08	2.15	2.38	2.42	2.78	2.73	2.47
Energía hidráulica (EH) [kWh/kWp]	1.62	1.71	1.85	1.77	1.69	1.5	1.58	1.81	1.86	2.26	2.2	1.92

Nota. Resultados simulados en SISIFO.

Figura 33

Comportamiento de resultados detallados de producción energética diaria, plano horizontal



En la Tabla 10, y Figura 34, se muestra la producción energética anual en el sistema de bombeo fotovoltaico, en kWh/kWp (1 valor). Por otra parte, la Figura 35 muestra la producción de bombeo anual, en m³/kWp (1 valor).

Tabla 10

Producción energética anual, plano horizontal.

Parámetros	Valor anual
CC - no carga, PMP [kWh/kWp]	1462.30
CA -no carga, PMP [kWh/kWp]	1337.35
CC - bomba conectada- [kWh/kWp]	1227.18
CA - bomba conectada- [kWh/kWp]	1138.29
E2 Energía mecánica de salida del motor [kWh / kWp]	867.29
Hidráulica [kWh/kWp]	662.35

Nota. Resultados simulados en SISIFO.

Figura 34

Comportamiento de la producción energética anual, plano horizontal

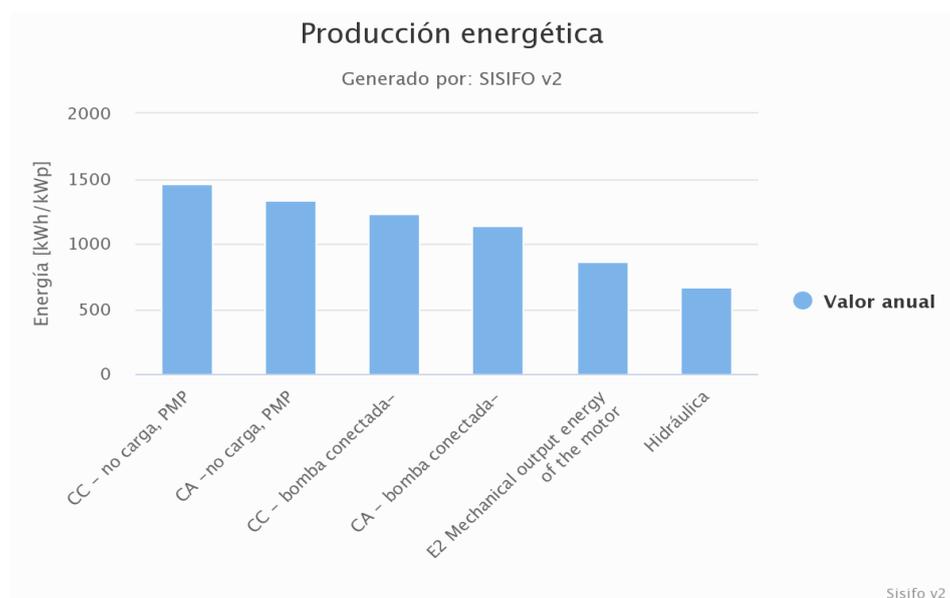
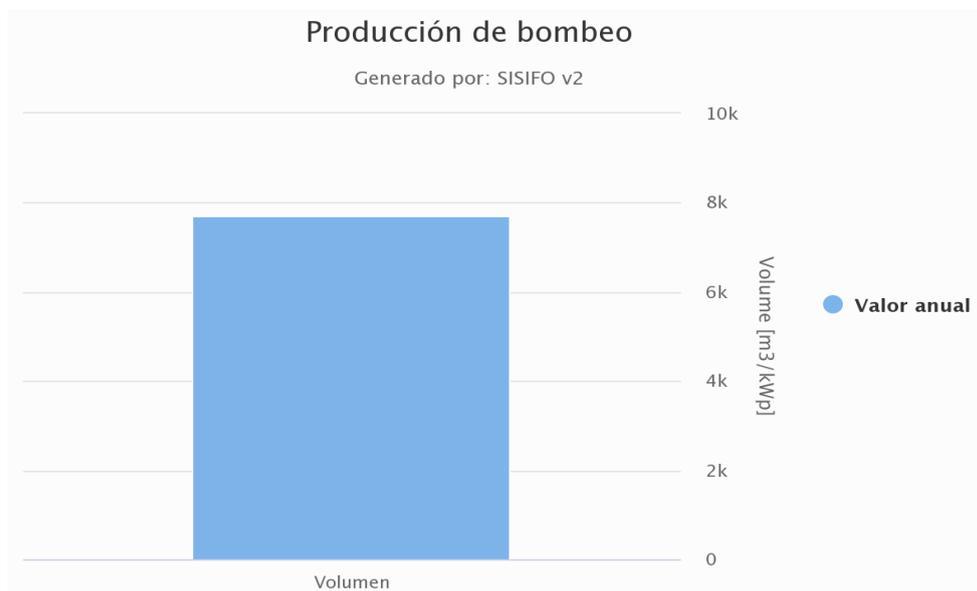


Figura 35*Resultados de producción de bombeo anual*

La simulación del sistema de bombeo fotovoltaico con el software SISIFO, permitió seleccionar los componentes del sistema de bombeo (bomba, motor e inversor) como una nueva metodología. También simuló parámetros de balance de energía y producción energética diaria mensual en cada punto del sistema de bombeo fotovoltaico; asimismo simula la producción energética anual. Esto permite comparar los cálculos teóricos (metodología tradicional) con los simulados y ver el comportamiento de producción energética del sistema en cada punto y para cada mes del año.

4.5 Resultados de evaluación económica

La evaluación económica se realizó para el sistema de bombeo fotovoltaico. Con respecto a la red eléctrica del concesionario, se ha visto conveniente no realizar la evaluación en esta investigación, debido que la red eléctrica de distribución MT y BT se encuentra muy alejada de la zona de estudio (aproximadamente 1km). Por otra parte los sistemas de utilización en MT, que comprenden red primaria, transformix, transformador y tableros con pliegos tarifarios MT2 y MT3, son para cargas concentradas de alto consumo de energía eléctrica como sector industrial, agroindustrial y/o estaciones de

bombeo. Además, cuando se quiera solicitar la factibilidad y fijación del punto de diseño al concesionario no sería factible desde el punto de vista técnico y económico. El sistema de bombeo fotovoltaico propuesto es de baja potencia.

4.5.1 Evaluación económica sistema de bombeo fotovoltaico

Para la evaluación económica del sistema de bombeo fotovoltaico, primeramente se determinó el presupuesto o inversión, costos de operación y mantenimiento, y el Costo Nivelado de Energía (Levelized Costs of Energy, LCOE). Luego se determinaron los indicadores económicos.

El presupuesto para el sistema de bombeo fotovoltaico asciende a S/. 58279.23. En la Tabla 11, se muestra el costo de inversión referencial para la construcción.

Tabla 11

Presupuesto sistema de bombeo fotovoltaico dimensionado.

N°	Descripción de componentes	Unidad	Cantidad	Precio (S/.)	Sub total (S/.)
I	Suministro de materiales				37873.10
1.1	Panel fotovoltaico mono cristalino SpolarPV SP470M6-96 de 470 Wp, 48 V	Und.	24	370.00	8880.00
1.2	Inversor de bombeo solar Hober HSPL11KHA/B, 11 kW, rango de voltaje de entrada: 500-750V DC, y salida: 380V AC	Und.	1	7500.00	7500.00
1.3	Caja de Protección IP65	Und.	1	120.00	120.00
1.4	Portafusibles de 20 y 25 A	Und.	2	20.00	40.00
1.5	Termo magnético trifásico de 25 A	Und.	1	150.00	150.00
1.6	Interruptor diferencial trifásico 25A, corriente residual nominal 30mA	Und.	1	172.00	172.00
1.7	Cable CENTELSA Fotovoltaico PV XLPE 2000 V 90°C SR, 14 AWG	m	30	3.89	116.70
1.8	Cable CENTELSA Fotovoltaico PV XLPE 2000 V 90°C SR, 12 AWG	m	40	5.36	214.40
1.9	Electrobomba Caprari tipo E6SX55/3X+MACW612A, 9.2 kW, 380 V C.A	Und.	1	4000.00	4000.00
1.10	Tubería flexible 6", con terminales de expansión y empalmes inoxidable	m	200	46.00	9200.00

1.11	Estructura soporte elevada, disposición de módulos vertical [2x12] (Modulo: 1956x1310 mm), con inclinación de 5°-25°, 3m de altura.	Und.	1	6800.00	6800.00
1.12	Puesta a tierra (01 Varilla Cu 5/8"x2.40 m, 01 conector de Cu tipo AB 5/8", 01 caja de registro de concreto, 01 saco de bentonita sódica 30 Kg, 10 m conductor Cu 16 mm ²).	Glb	1	680.00	680.00
II Montaje					14161.93
2.1	Montaje electromecánico del sistema de bombeo fotovoltaico	Glb	1	11361.93	11361.93
2.2	Acondicionamiento de pozo para bombeo de agua	Glb	1	2800.00	2800.00
Total (Costo Directo)					S/. 52035.03
Transporte de materiales					S/. 2 081.40
Gastos generales					S/. 4 162.80
Total					S/. 58 279.23

Así mismo en la Tabla 12, se muestran los costos de operación y mantenimiento para el sistema de bombeo fotovoltaico, que corresponde al mantenimiento de la electrobomba, y del generador fotovoltaico. Para la parte de generación en el campo fotovoltaica se consideró un cargo por mantenimiento de 27.75 \$/kW-año (Herrera y Vera, 2020). Tomando en cuenta ese cargo por mantenimiento y un cambio de dólar de S/. 4.00 al mes de agosto del 2021, equivale aproximadamente a 111 S/./kW-año.

Tabla 12

Costos anuales de operación y mantenimiento, sistema de bombeo fotovoltaico

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (S/.)	Sub total (S/.)
1.1	Mantenimiento electrobomba	Und.	1	350.00	350.00
1.2	Mantenimiento generador fotovoltaico (111 S/./kW-año)	Und.	1	1221.00	1221.00
Total					S/. 1571.00

El Costo Nivelado de Energía (LCOE), corresponde a la energía producida por el sistema fotovoltaico en todo el periodo de vida útil del proyecto, trasladando tanto los costos que se incurran en su operación en el mismo periodo como la generación a valor

presente; por medio de una tasa de descuento (García et al., 2015). El cálculo del LCOE está definidos por la Ecuación (20), para cada año t .

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (20)$$

Donde:

I_t : Inversión inicial (diseño, equipos, instalación, ingeniería) (S/).

M : Operación y mantenimiento (S/).

E_t : Generación eléctrica (kWh).

r : Tasa de descuento (%).

t : Tiempo de vida del sistema o planta de generación (años).

La tasa de descuento se define como la tasa a la cual la tasa nominal de interés excede a la de inflación. Estudios internacionales del costo de generación eléctrica en general, adoptan tasas de 5, y 7 %, como tasa de descuento en términos reales, sin embargo para proyectos que se cubren con inversión privada, puede adoptarse de tasas de descuento más altas. Además recomiendan realizar un análisis de sensibilidad, ya que nunca se tiene una certeza del comportamiento de los mercados. Se puede hacer análisis de sensibilidad con tasas de 5, 7, 9, 12, 13, y 15; y valorar el comportamiento del costo nivelado de energía (Guillen, 2015). Para la investigación, el LCOE de la generación fotovoltaica, se ha determinado con una tasa de descuento intermedia del 12%.

Los costos de operación y mantenimiento durante la vida útil del sistema de fotovoltaico son bajos a diferencia de los de las plantas térmicas convencionales; porque el consumo de combustible es prácticamente nulo; estos costos incluyen la limpieza regular, el monitoreo del rendimiento, el servicio de reemplazo del inversor y la bomba aproximadamente cada diez años. En la Tabla 13, se muestran los resultados de cálculo del LCOE del sistema fotovoltaico.

Tabla 13

Resultados Costo Nivelado de Energía Eléctrica (LCOE) del sistema fotovoltaico.

Año	Inversión	Producción Energía	Costos O&M	Costos recurrentes	Costos anuales totales	Producción a valor presente	Costos anuales a valor presente	
	(S/.)	(kWh)	(S/.)	(S/.)	(S/.)	(kWh)	(S/.)	
0	58279.23				58279.23		58279.23	
1		14815.35	1571.00		1571.00	13227.99	1402.68	
2		14815.35	1571.00		1571.00	11810.71	1252.39	
3		14815.35	1571.00		1571.00	10545.27	1118.21	
4		14815.35	1571.00		1571.00	9415.42	998.40	
5		14815.35	1571.00		1571.00	8406.63	891.43	
6		14815.35	1571.00		1571.00	7505.92	795.92	
7		14815.35	1571.00		1571.00	6701.71	710.64	
8		14815.35	1571.00		1571.00	5983.67	634.50	
9		14815.35	1571.00		1571.00	5342.56	566.52	
10		14815.35	1571.00	11500.00	13071.00	4770.15	4208.51	
11		14815.35	1571.00		1571.00	4259.06	451.62	
12		14815.35	1571.00		1571.00	3802.73	403.24	
13		14815.35	1571.00		1571.00	3395.30	360.03	
14		14815.35	1571.00		1571.00	3031.51	321.46	
15		14815.35	1571.00		1571.00	2706.71	287.02	
16		14815.35	1571.00		1571.00	2416.70	256.26	
17		14815.35	1571.00		1571.00	2157.77	228.81	
18		14815.35	1571.00		1571.00	1926.58	204.29	
19		14815.35	1571.00		1571.00	1720.16	182.40	
20		14815.35	1571.00		1571.00	1535.86	162.86	
		Totales				110 662.42	73 716.42	
		Costo nivelado de generación (S/./kWh)					0.666	

La producción de energía del sistema fotovoltaico es de 14815.35 kWh/año, el cargo por operación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico es S/. 1571.00, y el costo de reinversión en el año 10 de S/.11500.00 para el inversor solar y la bomba. Por otra parte la Agencia Internacional de Energía (IEA) asume descuentos entre 10 % - 12 % para sistemas fotovoltaicos (Hernández y Martínez, 2013). Se evaluó tomando un interés para el VAN del 10 %, y un LCOE constante durante el periodo de evaluación, la vida útil 20 años. En la Tabla 14, se muestran los resultados de evaluación económica para el sistema de bombeo fotovoltaico.

Tabla 14

Resultados de evaluación económica sistema de bombeo fotovoltaico

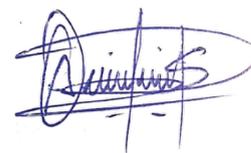
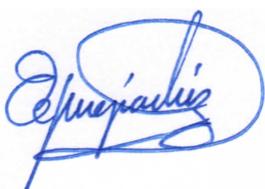
Año	Inversión (S/.)	Energía		Cuenta de resultados					Año de repago Años
		Producción Energía (kWh)	Precio del kWh SFV (LCOE) (S./kWh)	Ingresos (Ahorro esperado) (S/.)	Pagos (S/.)	Flujo Neto Caja (S/.)	FNC Actualizado (Cálculo del VAN) (S/.)	Flujo Neto Caja Acumulado (S/.)	
0	58279.23					-58279.23	-58279.23	-58279.23	
1		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	7543.70	-50735.54	
2		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	6857.90	-43877.63	
3		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	6234.46	-37643.18	
4		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	5667.69	-31975.49	
5		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	5152.45	-26823.04	
6		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	4684.04	-22139.00	
7		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	4258.22	-17880.78	
8		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	3871.11	-14009.67	
9		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	3519.19	-10490.48	
10	11500.00	14815.35	0.67	9869.06	13071.00	-3201.94	-1234.48	-11724.97	
11		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	2908.42	-8816.55	
12		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	2644.02	-6172.53	
13		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	2403.65	-3768.87	
14		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	2185.14	-1583.73	14.93
15		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	1986.49	402.76	
16		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	1805.90	2208.66	
17		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	1641.73	3850.39	
18		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	1492.48	5342.87	
19		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	1356.80	6699.67	
20		14815.35	0.67	9869.06	1571.00	8298.06	1233.45	7933.12	
				TIR (%)		12.00%	S/. 7 933.12		
				Año de repago		17.93			
				Interés para VAN		10%			
				VAN		S/. 7 933.12			

V. DISCUSIÓN

El nivel de radiación solar promedio mensual varía desde un mínimo de 3.69 kWh/m²/día en el mes de febrero, hasta un máximo de 5.10 kWh/m²/día en el mes de noviembre para un ángulo óptimo de inclinación calculado de 7.44°. Se aplicó el criterio de seleccionar la radiación en el mes más desfavorable febrero que fue 3.69 kWh/m²/día. Datos muy cercanos a los encontrados por Herrera y Vera (2020), cuya radiación en el mes más desfavorable resultó de 3.68 kWh/m²/día, y una inclinación óptima de 7.88°. También concuerdan con los datos encontrados por Dávalos (2019), obteniendo resultados de 3.71 kWh/m²/día de radiación solar y un ángulo óptimo de 7.5°. Resultados coincidentes, debido a que las zonas de estudio son muy cercanas y con condiciones de radiación similares.

La potencia del sistema de bombeo fotovoltaico para cultivo de 01 hectárea de maíz, resulto de 9.54 kWh/día, para una demanda hídrica de 75.8 m³/día, altura de 46.20 m incluido pérdidas del 10 %. La necesidades hídricas y potencia es superior a las encontradas por Dávalos (2019), obteniendo resultados 40 m³/día para cultivo de yuca, requirió 3117.4 Wh/día de energía hidráulica. También es mucho mayor a datos encontrados por Herrera y Vera (2020), necesidades hídricas para cultivo de café 32 m³/día, energía hidráulica 0.96 kWh/día, y una altura total equivalente de 11 m. Resultados difieren debido a que las necesidades hídricas son para diferentes plantaciones, además para el estudio se evaluó las necesidades hídricas para cada etapa de cultivo de maíz, y se tomó la más alta, por otra parte las alturas manométricas son diferentes debido a las topologías del terreno .

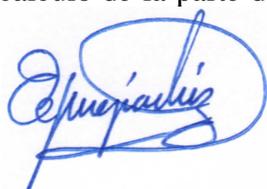
De acuerdo a cálculos teóricos en la etapa de dimensionamiento, se seleccionó una electrobomba Caprari E6SX55/3X+MACW612A, pudiendo dar una potencia 9.2 kW, 380 V CA, soportar un caudal pico de 48.89 m³/h, y disponer de una altura de 48 m, un valor mayor a los datos de diseño. La potencia del generador fotovoltaico es 11.28 kWp, el bombeo requiere 24 paneles monocristalinos SpolarPV SP470M6-96, 470 Wp, 48 V, conexión 12 en serie y 2 en paralelo. Por otra parte se seleccionó un inversor de bombeo solar Hober HSPL11KHA/B, 11 kW, entrada: 500-750V CD, salida: 380V CA. Topología del sistema muy similares, pero de capacidades mucho mayor a la encontradas por Herrera y Vera (2020), que seleccionó un generador fotovoltaico de bombeo que



requiere de 9 paneles de 135 Wp conectados en serie, 01 controlador Solar SubDrive, 1.1 kW, y 01 electrobomba centrífuga solar sumergida marca Pedrollo, modelo 4SR75Gm/15, monofásica, 1.1 kW (1.5 HP), 60 Hz, para un caudal pico de la bomba de 20.66 m³/h. Las capacidades y tamaño del sistema de bombeo están en función a las necesidades hídricas, alturas manométricas, y criterios del investigador a la hora de seleccionar los equipos.

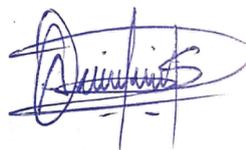
El programa SISIFO genera la irradiación horizontal global diaria que descarga automáticamente de la base de datos PVGIS, el programa realiza la simulación con la irradiación en el plano horizontal, y no con el ángulo de inclinación, se verifica que los valores más desfavorables de irradiación se dan en febrero (4.55 kWh/m²) y junio (4.48 kWh/m²). A diferencia de los datos de la NASA utilizados en el cálculo teórico, donde se determinó que irradiación más desfavorable se da en febrero (3.69 kWh/m²), para un ángulo de 7.44°. El programa selecciona una variedad de inversores que permite elegir el más óptimo, se seleccionó el Variador MX2, 11 kW, 380 V CA. También permite seleccionar la bomba más adecuada y sus curvas características, la bomba Caprari E6SX55/4P+MACW610A-8V, fue seleccionada como la mas optima, y el motor MACW610/3A-8, 7.5 kW resultó el mas optimo. Metodología que concuerda con Teves (2018), donde utilizó el SISIFO como un nuevo método y procedimiento para la selección de bomba, y que posteriormente, realizó una comparación entre el rendimiento de una bomba seleccionada con el método tradicional.

La bomba Caprari E6SX55/4P+MACW610A-8V selecciona mediante el SISIFO, se verifica que no soporta el caudal pico calculado (48.89 m³/h). Es por ese motivo que en el cálculo teórico se seleccionó una electrobomba de mayor capacidad de la misma marca Caprari E6SX55/3X+MACW612A, pudiendo dar una potencia de 9.2 kW, 380 V CA. El programa SISIFO también simulo la producción de energía diaria y anual (kWh/kWp), y la producción de bombeo diario y anual (m³/kWp), y los rendimientos globales PR (%), con respecto a estos parámetros existe una variación de lo simulado con lo calculado, debido que para los cálculos teóricos se tomó la radiación más desfavorable para un ángulo de inclinación calculado de 7.44°, mientras que el programa SISIFO simula con la radiación horizontal. La metodología del cálculo teórico y simulación concuerda con Calero (2017), que realizó una instalación de riego con bombeo fotovoltaico, para la producción de patata y tomate, utilizó el software PVSYST para el diseño y cálculo de la parte del sistema fotovoltaico, donde observó que coinciden con



los cálculos teóricos. Es importante realizar simulaciones, independientemente del software a utilizar, con la finalidad de comparar el cálculo teórico.

La evaluación económica del sistema de bombeo fotovoltaico resultó rentable con un VAN de S/. 7 933.12 positivo y un TIR 12 %, con un tiempo de recuperación a largo plazo de aproximadamente 15 años; para la evaluación económica se consideró un LCOE calculado de 0.67 S/./kWh; se evaluó tomando un interés para el VAN de 10 %, y la vida útil 20, también se consideró un costo de reinversión (año 10) de S/.11500.00 para el inversor y la bomba. Resultados que concuerdan con Ortega y Diez (2013), instalaron también un sistema de riego por goteo para el cultivo del maíz, considerando un VAN de € 24508.84, y TIR de 5.43, vida útil de la explotación de 15 años, dando rentabilidad al proyecto. Los criterios de evaluación en parte también concuerdan con Herrera y Vera (2020), a diferencia que en dicha investigación realizan la evaluación económica respecto a un grupo electrógeno monofásico a gasolina.



VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

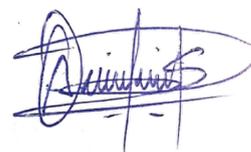
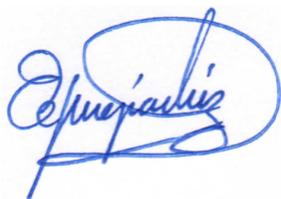
6.1 Conclusiones

- Se determinó que la radiación solar en la zona del proyecto varía desde un mínimo de 3.69 kWh/m²/día en el mes de febrero, hasta un máximo de 5.10 kWh/m²/día en noviembre para un ángulo óptimo de inclinación calculado de 7.44°. Para los cálculos se tomó el criterio de tomar la radiación en el mes más desfavorable (3.69 kWh/m²/día). Radiación suficiente para dimensionar el sistema de bombeo fotovoltaico.
- Se determinó que la potencia del sistema de bombeo para cultivo de 01 hectárea de maíz, resultó 9.54 kWh/día, para una demanda hídrica de 75.8 m³/día (20.54 m³/h), altura manométrica de 46.20 m que incluye pérdidas del 10 %.
- Se dimensionó el sistema de bombeo para riego agrícola, determinando una energía eléctrica de 23.85 kWh/día, y una potencia de 6,46 kW. La electrobomba seleccionada es una Caprari E6SX55/3X+MACW612A, pudiendo dar una potencia de hasta 9.2 kW, 380 V C.A, capaz de soportar un caudal pico de 48.89 m³/h, y disponer de una altura de 48 m, un valor mayor a los datos de diseño. La potencia nominal del generador fotovoltaico es 11 kWp, el bombeo requiere 24 paneles monocristalinos SpolarPV SP470M6-96, 470 Wp, 48 V, potencia pico 11.28 kWp. Por otra parte se seleccionó un inversor de bombeo solar Hober HSPL11KHA/B, 11 kW, entrada: 500-750V CD, salida: 380V CA. También se realizó cálculos de producción energética para el mes de dimensionado, la energía en la entrada del motor CA (2.17 kWh/kWp), energía mecánica salida del motor (1.73 kWh/kWp), y energía hidráulica (0.87 kWh/kWp), y la producción de bombeo (20.54 m³/kWp).
- Se simulo el sistema de bombeo fotovoltaico con software SISIFO, que permitió seleccionar los componentes del sistema de bombeo (bomba, motor e inversor), y simulo parámetros de balance de energía. El programa genera la irradiación horizontal global diaria que descarga



automáticamente de la base de datos PVGIS, el programa realizó la simulación con la irradiación en el plano horizontal. Selecciona una variedad de inversores que permite elegir el más óptimo, el Variador MX2, 11 kW, 380 V CA es el más óptimo a seleccionar. También permitió seleccionar la bomba más adecuada incluido sus curvas características, la bomba Caprari E6SX55/4P+MACW610A-8V fue la más óptima. El motor MACW610/3A-8, 7.5 kW fue el más adecuado. Se verifica que la bomba E6SX55/4P+MACW610A-8V más óptima selecciona mediante el SISIFO, no soporta el caudal pico calculado (48.89 m³/h).

- El software SISIFO, también simuló la producción energética diaria mensual del sistema de bombeo fotovoltaico, a continuación se muestra algunos datos para el mes de febrero, la energía de entrada del motor CA (3.01 kWh/kWp), energía mecánica a la salida del motor (2.28 kWh/kWp), energía hidráulica (1.71 kWh/kWp), y la producción de bombeo (20.68 m³/kWp). Con respecto a la producción energética anual toma un promedio de la radiación horizontal, resultando que la energía bomba conectada CA (1138.29 kWh/kWp), energía mecánica salida del motor (867.29 kWh/kWp), energía hidráulica (662.35 kWh/kWp), y producción de bombeo (7713,65 m³/kWp).
- La evaluación técnica y económica del sistema de bombeo fotovoltaico resulta rentable con un VAN de S/. 7 933.12 positivo y un TIR 12 %, con un tiempo de recuperación a largo plazo de aproximadamente 15 años; para la evaluación económica se consideró un LCOE calculado de 0.67 S/./kWh; se evaluó tomando un interés para el VAN de 10 %, y la vida útil 20, también se consideró un costo de reinversión (año 10) de S/.11500.00 para el inversor y la bomba.



6.2 Recomendaciones

- Se recomienda al propietario de la parcela, buscar el financiamiento en algunas convocatorias para financiamiento de proyectos de investigación en energías renovables. Así mismo se recomienda hacer de conocimiento a la Sub Gerencia Regional de Jaén, para la implementación de proyectos de sistemas de bombeo fotovoltaico para la agricultura, donde se presenten condiciones similares de radiación y potencia requerida, favoreciendo de esta manera a los pequeños agricultores a mejorar su calidad de vida.
- Se recomienda hacer la evaluación económica respecto a otros escenarios, red eléctrica, sistema de bombeo eólica, etc., y así justificar la viabilidad del proyecto.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S. A., Siddiqui, M. U., Alawami, A. T., y Elamin, I. M. (2018). A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87, 61-76.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.02.010>
- Alonso, M., y Chenlo, F. (2005). *Sistemas de Bombeo Fotovoltaico*. <https://www.eoi.es>
- Calero, A. (2017). *Instalación de riego con bombeo solar fotovoltaico en Benlloch* (Número October) [UNIVERSITAT JAUME I ESCOLA].
<http://hdl.handle.net/10234/173561>
- Castro, M., Colmenar, A., Fiffe, R. P., Perez, M., Perpiñan, O., y Perulero, J. M. (2011). *Sistemas de Bombeo Eólicos y Fotovoltaicos* (Progensa (ed.); 2 ed.).
- Dávalos, J. (2019). *Diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el caserío la Guayaba, distrito de Bellavista, Jaén – Cajamarca* [Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/100>
- Eker, B. (2005). Solar powered water pumping system. *Trakia Journal of Sciences*, 3(1312-1723), 7-11. <http://www.uni-sz.bg>
- García, M. F., Marino, I., Hernández, I., y Valdés, J. (2015). Cálculo del costo nivelado de la energía para una planta fotovoltaica en el noroeste de la república Mexicana. *Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa*.
<https://www.researchgate.net/publication/342433294%0ACÁLCULO>
- Guillen, O. (2015). *Energía eólica para generación eléctrica* (Editorial Trillas (ed.); 1era Ed.).
- Herrera, R., y Vera, J. (2020). *Dimensionamiento de un sistema de bombeo solar para riego agrícola en el centro Poblado Roblepampa, Utcubamba – Amazonas* [Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/283>
- IDAE. (2009). *Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica Pliego. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Aisladas de Red*. www.idae.es
- Korpale, V. S., Kokate, D. H., y Deshmukh, S. P. (2016). Performance Assessment of Solar Agricultural Water Pumping System. *Energy Procedia*, 90, 518-524.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.219>

- Mejía, E. (2019). Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el suministro de energía eléctrica al laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica. *Revista Científica Pakamuros*, 7(2), 73-88.
<http://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/95/89>
- Ortega, R., y Diez, E. (2013). *Instalación de un sistema de riego por goteo para el cultivo del maíz San Cebrián de Campos en (Palencia)* [Universidad de Valladolid - Campus de Soria]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/3357>
- Osorio, L., y Montero, R. (2016). Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal. *Ingeniería Energética*, XXXVII(1), 45-54.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012016000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Otieno, J. O., Omuto, C. T., y Gitau, A. A. (2018). *Performance evaluation and economic analysis of solar photo-voltaic water pumping systems : Case of Abakore borehole water supply system in Kenya*. 10(September), 111-119.
<https://doi.org/10.5897/IJWREE2017.0711>
- Pareja, M. (2016). *Energía Solar Fotovoltaica. Cálculo de una Instalación Aislada*. (Marcombo (ed.); 3era Ed.).
- Sado, K. A., Hassan, L. H., y Moghavvemi, M. (2018, noviembre 20). Design of a PV-powered DC water pump system for irrigation: A case study. *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018*.
<https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8542072>
- Schilardi, C., Funes, D., Lunghi, S., Yanela;, Longo, V., Méjica, A. P., Nogal, P., y Ramiro, P. (2014). *Diseño de un Sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico para Riego por Goteo en Viñedos*.
- Sontake, V. C., y Kalamkar, V. R. (2016). Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1038-1067.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.01.021>
- Teves, R. (2018). *Large power hybrid PV pumping for irrigation* (Número 21) [Universidad Politecnica de Madrid]. <http://oa.upm.es/>
- Xue, J. (2017). Photovoltaic agriculture - New opportunity for photovoltaic applications in China. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 73, pp. 1-9). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.098>

ANEXOS

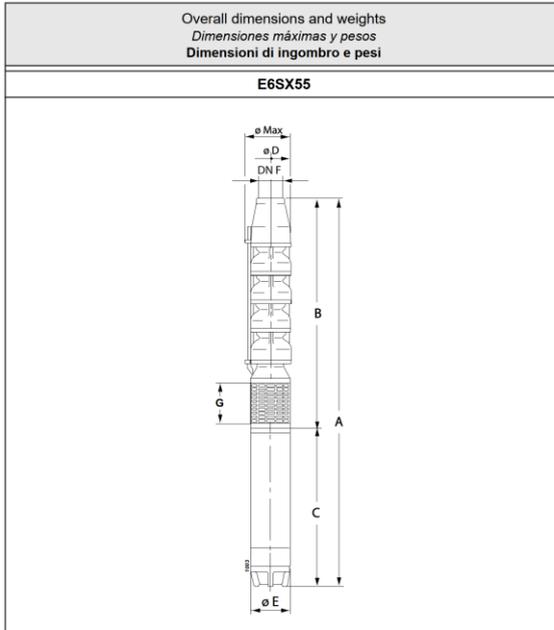
ANEXO 01

Ficha técnica de electrobomba

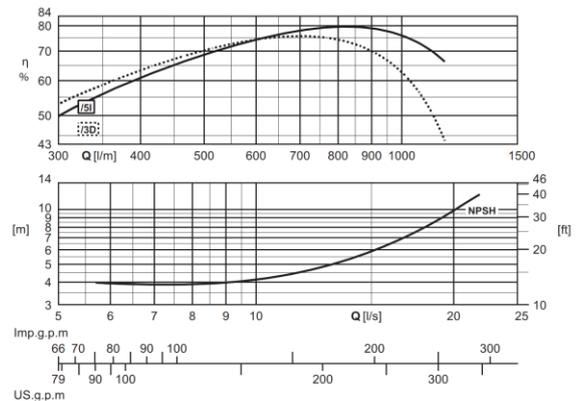
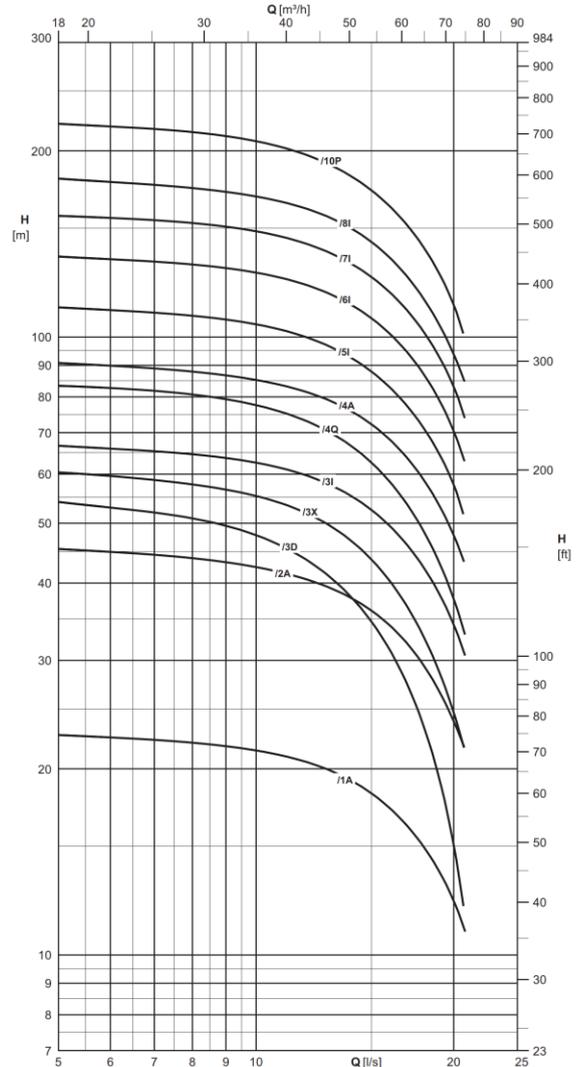


E6SX55

Operating data
Características de funcionamiento
Caratteristiche di funzionamento



Type Tipo	Ø max [mm]	Weight Peso [kg]	A	B	C	D	E	F	G
E6SX55/1A+MACW65A	150	46,5	1067	497	570	141	143	G3	124
E6SX55/1A+MACW65A	150	46,5	1067	497	570	141	143	G3	124
E6SX55/2A+MACW610A	150	58,5	1282	612	670	141	143	G3	124
E6SX55/2A+MACW610A	150	58,5	1282	612	670	141	143	G3	124
E6SX55/3D+MACW610A	150	63	1397	727	670	141	143	G3	124
E6SX55/3X+MACW612A	150	66	1427	727	700	141	143	G3	124
E6SX55/3I+MACW615A	150	69,5	1442	727	715	141	143	G3	124
E6SX55/4Q+MACW617A	150	77	1707	957	750	141	143	G3	124
E6SX55/4A+MACW620A	150	81,5	1632	842	790	141	143	G3	124
E6SX55/5I+MACW625A	150	90	1787	957	830	141	143	G3	124
E6SX55/6I+MACW630A	150	98,5	1992	1072	920	141	143	G3	124
E6SX55/7I+MACW635A	150	113	2242	1187	1055	141	143	G3	124
E6SX55/8I+MACW640A	150	133	2467	1302	1165	141	143	G3	124
E6SX55/10P+MACW650B	150	167,5	2814	1532	1282	141	143	G3	124



The hydraulic performance characteristics are guaranteed as conforming to standard UNI/ISO 9906 Grade 3B.

Las características hidráulicas de funcionamiento están garantizadas según la norma UNI/ISO 9906 Grado 3B. Le caratteristiche di funzionamento vengono garantite secondo la norma: UNI/ISO 9906 Grado 3B.

ANEXO 02

Ficha técnica de paneles fotovoltaicos

Electrical Characteristics at Standard Test Conditions (STC) / Normal Operating Cell Temperature (NOCT)

Module Type	SP460M6-96	SP465M6-96	SP470M6-96	SP475M6-96	SP480M6-96
Maximum Power -Pmax (W)	460 / 341	465 / 345	470 / 348	475 / 352	480 / 356
Maximum Power Voltage - Vmp (V)	51.19 / 49.33	51.46 / 47.73	51.73 / 48.13	52.23 / 48.40	52.73 / 48.66
Maximum Power Current - Imp (A)	8.98 / 6.91	9.03 / 7.22	9.08 / 7.23	9.09 / 7.27	9.10 / 7.31
Open-circuit Voltage - Voc (V)	62.11 / 58.30	62.50 / 58.40	62.60 / 58.80	62.90 / 59.20	63.46 / 59.59
Short-circuit Current - Isc (A)	9.61 / 7.59	9.66 / 7.67	9.75 / 7.69	9.81 / 7.72	9.82 / 7.76
Module Efficiency STC (%)	17.95%	18.15%	18.34%	18.54%	18.73%

Electrical Characteristics at Standard Test Conditions (STC) / Normal Operating Cell Temperature (NOCT)

Module Type	SP485M6-96	SP490M6-96	SP495M6-96	SP500M6-96	SP505M6-96	SP510M6-96
Maximum Power -Pmax (W)	485 / 359	490 / 363	495 / 367	500 / 371	505 / 374	510 / 378
Maximum Power Voltage - Vmp (V)	53.1 / 48.91	53.48 / 49.24	53.85 / 49.69	54.21 / 50.27	54.53 / 50.58	54.85 / 51.47
Maximum Power Current - Imp (A)	9.13 / 7.34	9.16 / 7.37	9.19 / 7.38	9.22 / 7.38	9.26 / 7.39	9.29 / 7.41
Open-circuit Voltage - Voc (V)	64.22 / 60.73	64.57 / 60.91	64.96 / 61.28	65.32 / 61.68	65.61 / 61.79	65.96 / 61.98
Short-circuit Current - Isc (A)	9.81 / 7.68	9.86 / 7.74	9.89 / 7.78	9.94 / 7.81	9.99 / 7.86	10.04 / 7.92
Module Efficiency STC (%)	18.93%	19.12%	19.32%	19.51%	19.71%	19.90%
Power tolerance	0~+5W		Operating Temperature(°C)		-40 C ~+85 C	
Temperature coefficients of Pmax	-0.38%/C		Maximum system voltage		1000/1500V	
Temperature coefficients of Voc	-0.33%/C		Maximum series fuse rating		20A	
Temperature coefficients of Isc	0.05%/C		Nominal operating cell temperature		45±2 C	

Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono-crystalline 156.75×156.75mm
No. of cells	96 (8×12)
Dimensions	1956×1310×40 / 45mm
Weight	26.5 kg
Front Glass	3.2mm, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	1×4.0mm ² , Length:900mm or Customized Length
Packaging Configuration	To be determined according to customized requests

SPM6-96

460-510 Watt

MONO CRYSTALLINE MODULE

- SP460M6-96
- SP475M6-96
- SP490M6-96
- SP505M6-96

- SP465M6-96
- SP480M6-96
- SP495M6-96
- SP510M6-96

- SP470M6-96
- SP485M6-96
- SP500M6-96

19.90%

Module efficiency

12

years

Product warranty

510 W

Highest power output

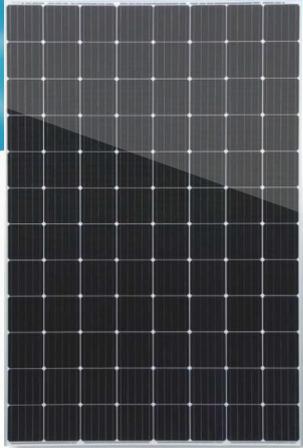
25

years

Linear power warranty

0 ~ +5W

Positive power tolerance







ANEXO 03

Ficha técnica variador de frecuencia

PRODUCT MANUAL

Specification Parameter

Hober Solar Pumping Inverter Model		HSP5500HA/B	HSP7500HA/B	HSPL11KHA/B	HSPL15KHA/B
DC input	Rated Power(W)	5500W	7500W	11000W	15000W
	Min DC Input Voltage(V)	460V	460V	460V	460V
	Max DC Input voltage(V)	750V	750V	750V	750V
	Rated Power Of DC Input Voltage Request(V)	500-750V	500-750V	500-750V	500-750V
	MPPT efficiency	>99%	>99%	>99%	>99%
AC output	Rated Power AC voltage (v) 3phase	380v	380v	380v	380v
	Rated Power AC current (A)	13	18	24	30
	Inverter efficiency	99%	99%	99%	99%
	Output frequency(Hz)	0-50/60	0-50/60	0-50/60	0-50/60
Water level sensor(water well)		Yes	Yes	Yes	Yes
Water level sensor(water tank)		Yes	Yes	Yes	Yes
AC Switcher		Optional	Optional	Optional	Optional
GPRS Monitor&Controller		Optional	Optional	Optional	Optional
Protection type		Ip65 DC input Low/Over Voltage DC Input Anti-Reverse Output Overload, Output short circuit Over temperature Sensor of water Empty /Full (Water empty of Well and Water full of Tank) Lightning Dry run protection by software			
Operating environment:	Noise(1 m)	< 50dB			
	Operating environment temperature	-10 to 60 Degree			
	Humidity	15%~+95%RH			
	Using altitude(m)	< 4000Altitude higher than 1000m pls consider to use less loads)			
	Others	Prohibiting the installation location: direct sunlight, thick dust, corrosive gas or oil mist, flammable gas, liquid.etc			
Adapted Pump	HP	≤7.5HP	≤10HP	≤15HP	≤20HP
	Rated Power(W)	≤5500W	≤7500W	≤11000W	≤15000W
	Rated Frequency (Hz)	0-50/60	0-50/60	0-50/60	0-50/60
	Rated voltage(Vac)	AC-380V -3 phase	AC-380V -3 phase	AC-380V -3 phase	AC-380V -3 phase
Solar Panel	Rated Power(W)	1.3-1.5 times AC 3 phase pump power	1.3-1.5 times AC 3 phase pump power	1.3-1.5 times AC 3 phase pump power	1.3-1.5 times AC 3 phase pump power

HOBER TECHNOLOGY CO.,LTD



ANEXO 04

Ficha técnica de cables

CABLE CENTELSA FOTOVOLTAICO H1Z2Z2-K 1,0 kV AC (1,5 kV DC) 90°C HF FR

Conductor		Aislamiento		Cubierta		Peso Total Aproximado	Ampacidad ⁽¹⁾		
Calibre	Resistencia Eléctrica DC a 20°C	Espesor Nominal	Diametro Aproximado	Espesor Nominal	Diametro Aproximado		Un Cable al Aire	Un Cable Sobre una Superficie	Dos Cables en Contacto Sobre Superficie
mm ²	Ω/km	mm	mm	mm	mm	kg/km	A		
1,5	13,2980	0,70	3,06	0,80	4,74	31	30	29	24
2,5	7,9693	0,70	3,53	0,80	5,21	42	41	39	33
4	4,9408	0,70	4,08	0,80	5,76	58	55	52	44
6	3,2906	0,70	4,66	0,80	6,34	78	70	67	57
10	1,8928	0,70	5,65	0,80	7,33	120	98	93	79
16	1,2036	0,70	6,54	0,90	8,44	183	132	125	107
25	0,7717	0,90	8,21	1,00	10,31	280	176	167	142
35	0,5484	0,70	9,38	1,10	11,66	380	218	207	176
50	0,3815	1,00	11,08	1,20	13,58	537	276	262	221
70	0,2689	1,10	13,05	1,20	15,55	752	347	330	278
95	0,2038	1,10	15,24	1,30	17,94	980	416	395	333
120	0,1592	1,20	17,26	1,30	19,96	1254	488	464	390
150	0,1281	1,40	19,31	1,40	22,23	1549	566	538	453
185	0,1048	1,60	21,40	1,60	24,72	1893	644	612	515
240	0,0793	1,70	27,77	1,70	31,31	2593	775	736	620

CABLE CENTELSA FOTOVOLTAICO PV XLPE 2000 V 90°C SR

Conductor		Aislamiento		Peso Total Aproximado	Ampacidad ⁽²⁾	
Calibre	Resistencia Eléctrica DC a 20°C	Espesor Nominal	Diametro Aproximado		Un Cable al Aire	Hasta Tres Conductores en Ducto
AWG	Ω/km	mm	mm	kg/km	A	
14	8,4443	1,90	5,92	50	30	23
12	5,3149	1,90	6,42	65	41	30
10	3,3436	1,90	7,06	88	56	41
8	2,1021	2,16	8,36	126	78	55
6	1,3226	2,16	9,42	182	106	73
4	0,8478	2,16	10,44	263	141	96
2	0,5332	2,16	11,98	389	190	129
1/0	0,3351	2,67	14,94	604	259	172
2/0	0,2659	2,67	16,08	739	300	194
4/0	0,1688	2,67	19,52	1140	405	260
250	0,1429	3,05	21,56	1365	455	290
500	0,0728	3,05	30,69	2650	703	430

Notas:

Los datos aquí registrados son nominales y están sujetos a las tolerancias según las normas y las prácticas normales de fabricación. Otras configuraciones y calibres no especificados en este catálogo, están disponibles bajo pedido.

(1) Criterios de ampacidad según UNE (Tabla A.3), temperatura conductor de 120°C y temperatura ambiente de 60°C.

(2) Capacidad de corriente según NTC 2050 (NEC), temperatura conductor de 90°C y temperatura ambiente de 30°C.

