

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA
MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE
BOMBEO FOTOVOLTAICO EN EL DISTRITO DE YAURISQUE –
CUSCO”

Presentado por:

CINDY PIERINE ASMAT CÁCERES.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA

Lima – Perú

2018

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento:

A mi madre, **Nancy Cáceres Montánchez**, por su constante aliento, motivación y empuje, recordándome a cada momento mis objetivos.

A mi padre, **Jorge Asmat Terán** quien me brindo sus conocimientos, acompañamiento y experiencia.

Al **José Luis Calle Maraví, PhD** por su asesoría y apoyo en la realización de este trabajo de investigación

Al **MSc. Manuel Barreno Galloso** por su acompañamiento lleno de profesionalismo, historias, risas y paciencia, fue un gran apoyo.

Al **Arq. Victor E. Linares Zaferson**, por su orientación, apoyo y sugerencias a mi persona como a la presente investigación.

Al **Ingeniero Pedro Zanabria Pacheco**, presidente del Centro de Capacitación para el Desarrollo (CECADE), por su apoyo en brindarme los recursos necesarios para la realización de esta investigación.

A mis amigos por brindarme alegría y entusiasmo en momentos difíciles, además de las personas que aparecieron en mi vida, y me ayudaron a aumentar mi motivación,

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre y a mi padre, gracias a su apoyo incondicional, su acompañamiento y las fuerzas que me dieron en todo momento, este es otro paso para cumplir mis sueños.

RESUMEN

El Centro de Capacitación de Desarrollo (CECADE) investiga y capacita en las diferentes aplicaciones del uso de energías renovables en el Distrito de Yaurisque, Provincia de Paruro, Departamento de Cusco; por ende ha implementado un sistema donado de bombeo fotovoltaico (FV) compuesto por una bomba solar, un panel FV y un tanque elevado con la finalidad de ser usado en riego para agricultura en las épocas secas (abril-septiembre), sin embargo; los componentes de este sistema necesitan ser evaluados para corroborar que actúan según las características técnicas dada por el fabricante, bajo las diferentes condiciones climáticas del lugar.

El periodo de prueba de esta investigación fue del 30 de agosto al 6 de septiembre, el volumen diario promedio suministrado en campo fue $4.17 \text{ m}^3/\text{día}$, esto se debe a que el abatimiento del pozo impedía el bombeo continuo a pesar de las buenas condiciones de radiación. La eficiencia global del sistema es 24.95%, obtenida del producto de las eficiencias de la bomba solar (26.12%) y el panel fotovoltaico (95.54%).

En el análisis estadístico se consideró las variables independientes tales como: la radiación solar, temperatura, velocidad del viento; y como variable dependiente el caudal suministrado por la bomba y la corriente generada por el panel fotovoltaico, determinándose que estas variables son muy dependientes de la radiación solar.

Finalmente, el sistema de bombeo fotovoltaico no trabaja a su máxima eficiencia debido a que la bomba está funcionando a una altura mucho menor a la óptima. Bajo estas condiciones se ha determinado que el área máxima a irrigar es de 3400 m^2 para los cultivos de maíz amiláceo, trigo y hortalizas, de acuerdo a los requerimientos de agua de estos cultivos, que son los que se adaptan a las condiciones climáticas y altura de la zona.

Palabras clave: radiación solar, sistema de bombeo fotovoltaico, energías renovables, bomba solar sumergible, panel fotovoltaico, clima.

ABSTRACT

The “Centro de Capacitation de Desarrollo” (CECADE) researches and trains the different applications of the use of renewable energies in the District of Yaurisque, Department of Cusco; therefore has implemented a donated photovoltaic pumping system composed by a solar pump, a photovoltaic panel and a raised tank with the purpose for being used in irrigation for agriculture in dry seasons (April-September). However; the components of this system need to be evaluated to corroborate that they act according to the technical characteristics given by the manufacturer, under the different climatic conditions of the place and that they respond with the necessary efficiency for its purpose.

The testing period of this investigation was from August 30th to September 6th, the daily volume supplied in field was $4.17\text{m}^3/\text{day}$, and this is because the slump of the well did not allow the continuous pumping despite the good radiation conditions. The global efficiency is 24.95%, obtained from the product of the efficiencies of the solar pump (26.12%) and the photovoltaic panel (95.54%).

For the statistical analysis, the independent variables were considered such as: radiation, temperature, wind speed; as a dependent variable the flow supplied by the pump and the current generated by the photovoltaic panel, determining that these variables are very dependent on solar radiation.

In conclusion, the photovoltaic pumping system don't work at maximum efficiency because the pump is running at a much lower than optimal height. Under these conditions have been calculated that the maximum area to irrigate is 3400 m^2 , for crops of corn starch, wheat and vegetables, according to the water requirements of these crops, which are adapting to climate and altitude conditions of the area.

Keywords: solar radiation, photovoltaic pumping system, renewable energy, solar pump, photovoltaic panel, weather.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	JUSTIFICACIÓN	2
1.2.	OBJETIVOS	2
1.2.1.	OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1.	ANTECEDENTES.....	4
2.2.	DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	5
2.2.1.	LOCALIZACIÓN.....	5
2.2.2.	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	6
2.2.3.	SITUACIÓN ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	7
2.3.	ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	9
2.3.1.	RADIACIÓN SOLAR.....	9
2.3.2.	LA ARQUITECTURA SOLAR.....	10
2.3.3.	MOVIMIENTO DE LA TIERRA.....	12
2.3.4.	APLICACIONES Y VENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR.....	13
2.3.5.	PANEL FOTOVOLTAICO.....	14
2.3.6.	CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO	17
2.3.7.	PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO.....	19
2.3.8.	MATERIALES DE FABRICACIÓN.....	20
2.3.9.	PRINCIPIOS DE CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA.....	21
2.4.	CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE ELECTRICIDAD	23
2.4.1.	LA CORRIENTE ELÉCTRICA (I).....	23
2.4.2.	VOLTAJE ELÉCTRICO O DIFERENCIAL DE POTENCIAL (V).....	23
2.4.3.	POTENCIA ELÉCTRICA (P).....	24
2.4.4.	ENERGÍA ELÉCTRICA.....	24
2.5.	CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE HIDRÁULICA	24
2.5.1.	SUBSISTEMA DE MOTOR-BOMBA.....	24
2.5.2.	CURVAS CARACTERISTICAS DE LAS BOMBAS SOLARES.....	26
2.5.3.	CARGA DINÁMICA TOTAL.....	28
2.5.4.	PRINCIPALES COMPONENTES HIDRÁULICOS.....	28
2.5.5.	CONTROLADORES.....	30
2.6.	BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	31
2.6.1.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO	31
2.6.2.	COMPONENTES DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.....	31
2.6.3.	APLICACIONES DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.....	33

2.6.4.	METODOS DE RIEGO CON SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.	34
2.6.5.	DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.	35
2.7.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO	38
2.8.	ANÁLISIS DE LA DEMANDA HÍDRICA DE CULTIVOS	39
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	42
3.1.	MATERIALES	42
3.1.1.	SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO	42
3.1.2.	SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO.....	43
3.2.	PROCEDIMIENTOS.....	44
3.2.1.	PRIMERA ETAPA: RECONOCIMIENTO DEL ÁREA EXPERIMENTAL Y DE LOS EQUIPOS.....	45
3.2.2.	SEGUNDA ETAPA: MEDICIÓN Y MONITOREO DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.....	46
3.2.2.1.	MEDICIÓN Y MONITOREO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE BOMBEO	47
3.2.2.2.	MEDICIÓN Y MONITOREO DEL VOLUMEN DIARIO BOMBEADO.....	48
3.2.3.	TERCERA ETAPA: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS MEDIDOS EN CAMPO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	49
3.2.3.1.	EFICIENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO	49
3.2.3.2.	EFICIENCIA DE LA BOMBA SOLAR	50
3.2.3.3.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.....	51
3.2.3.4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	52
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1.	EFICIENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO:	53
4.2.	EFICIENCIA DE LA BOMBA SOLAR	55
4.3.	COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO	61
4.3.1.	INFLUENCIA DE LOS FACTORES METEOROLÓGICOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO SOLAR	61
4.3.2.	RELACIÓN ENTRE CAUDAL Y POTENCIA.....	62
4.3.3.	RADIACIÓN SOLAR / PANEL FOTOVOLTAICO.....	63
4.3.4.	PANEL FOTOVOLTAICO / BOMBA	64
4.3.5.	SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.....	65
4.3.5.1.	CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR INSTANTÁNEA	65
4.3.5.2.	VOLUMEN DE AGUA DIARIO CON BOMBEO CONTINUO	66
4.4.	EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR OBTENIDA EN CAMPO	68
4.5.	NECESIDAD DE AGUA DE LA CÉDULA DE CULTIVO	70
V.	CONCLUSIONES	75
VI.	RECOMENDACIONES	77
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
VIII.	ANEXOS	82

NOMENCLATURA

V_{oc}	=	Voltaje de circuito abierto (v)
$V_{m\acute{a}x}$	=	Voltaje máximo del panel (v)
V	=	Tensión (v)
I_{sc}	=	Corriente de cortocircuito (A)
$I_{m\acute{a}x}$	=	Corriente máxima del panel (A)
I	=	Intensidad (A)
$P_{m\acute{a}x}$	=	Potencia máxima (W)
H	=	Altura total (m)
Q_T	=	Caudal de prueba (m^3/h)
H_{ST}	=	Nivel esttico del agua (m)
H_{DT}	=	Nivel dinámico del agua (m)
Q_{AP}	=	Caudal medio o aparente (m)
CDT	=	Carga Dinámica Total (m)
H_f	=	Altura de Fricción (m)
H_{TE}	=	Altura de bombeo
H_D	=	Altura del depósito (m)
V_d	=	Volumen diario de agua requerido ($m^3/d\acute{a}a$)
μ	=	Eficiencia de la motor-bomba
E_H	=	Energía hidráulica (kWh/día)
E_{MB}	=	Energía eléctrica consumida por la motor-bomba (Wh/día)
R	=	Intensidad de la Radiación solar (W/m^2)

ÍNDICE CUADROS

Cuadro 1: Principales actividades económicas de la zona de Yaurisque, Cusco	8
Cuadro 2: Cédula de cultivo en situación actual.	9
Cuadro 3: Métodos de riego para uso con bombeo solar	34
Cuadro 4: Tipos de sistemas de bombeo fotovoltaico.....	36
Cuadro 5: Años de vida útil de equipos de sistemas Fotovoltaicos y sistemas de combustión interna.	39
Cuadro 6: Valores de la curva de Intensidad - Voltaje.....	53
Cuadro 7: Valores de la eficiencia de campo medidos según la carga dinámica total. ...	57
Cuadro 8: Análisis estadístico de la relación de los factores climáticos con la generación de la energía fotovoltaica	62
Cuadro 9: Valores del volumen, radiación solar y tiempo de llenado.....	67
Cuadro 10: Análisis estadísticos de la relación del volumen de agua con el tiempo de llenado y la Radiación Solar durante los días de medición.	67
Cuadro 11: Datos de la radiación solar promedio en los días de medición.....	68
Cuadro 12: Datos de la Energía Solar en las horas solar pico.....	69
Cuadro 13: Volumen diario suministrado por el sistema de bombeo FV.	70
Cuadro 14: Área máxima de riego según la necesidad de agua de los cultivos.	71
Cuadro 15: Modelos de bombas solares según el caudal y altura de descarga	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de la zona de estudio (CECADE)	6
Figura 2: Diagrama Polar de trayectorias del sol.	11
Figura 3: Diagrama Cartesiano de trayectorias del sol.....	12
Figura 4: Movimiento de la Tierra respecto al Sol.....	13
Figura 5: Conexión en serie de un sistema fotovoltaico.....	16
Figura 6: Conexión en paralelo de un sistema fotovoltaico	16
Figura 7: Curva característica de corriente – voltaje.....	17
Figura 8: Efecto de la temperatura en la curva característica I-V.	18
Figura 9: Efecto de la temperatura en el punto de máxima potencia.	18
Figura 10: Generación eléctrica de una celda fotovoltaica.....	22
Figura 11: Curvas de funcionamiento de una bomba solar.	27
Figura 12: Curva de eficiencia de una bomba.	27
Figura 13: Principales componentes hidráulico de un sistema de bombeo de agua.....	30
Figura 14: Esquema de un sistema solar para bombeo de agua	32
Figura 15: Arreglos de sistemas de bombeo solar.....	38
Figura 16: Ubicación de los equipos en el sistema de bombeo fotovoltaico.....	45

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Mapa de procesos de la metodología de tesis.	44
Gráfico 2: Curva de Intensidad – Voltaje para una Radiación de 800 W/m^2 (En campo)	54
Gráfico 3: Curva de Intensidad – Voltaje (Ficha técnica, módulo GYP 180W).....	54
Gráfico 4: Curva de Potencia – Caudal (Lorentz PS 150).....	56
Gráfico 5: Eficiencia de la Bomba sumergible Lorentz PS150 según la carga dinámica total.	57
Gráfico 6: Eficiencia de la Bomba sumergible Lorentz PS150 según el caudal.	59
Gráfico 7: Condiciones de abatimiento a diferentes caudales.....	60
Gráfico 8: Variaciones diarias del nivel de agua del pozo	60
Gráfico 9: Relación entre caudal y potencia.....	63
Gráfico 10: Potencia = f (Radiación solar).....	64
Gráfico 11: Caudal = f (Potencia)	65
Gráfico 12: Caudal = f (Radiación solar)	66
Gráfico 13: Comparación de la radiación histórica (2014-2016) y la radiación de los días medidos (2017).....	69
Gráfico 14: Valores de la Energía Solar durante el periodo de medición.	70
Gráfico 15: Alternativa 1 según la oferta y demanda del volumen del agua.....	72
Gráfico 16: Alternativa 2 según la oferta y demanda del volumen del agua.....	72
Gráfico 17: Alternativa 3 según la oferta y demanda del volumen del agua.....	73
Gráfico 18: Alternativa 4 según la oferta y demanda del volumen del agua.....	73
Gráfico 19: Alternativa 5 según la oferta y demanda del volumen del agua.....	74
Gráfico 20: Niveles de abatimiento del pozo bajo diferentes caudales.	92
Gráfico 21: Diagrama de diseño del pozo en condiciones normales de trabajo.....	93
Gráfico 22: Curva de potencia necesaria para diferentes caudales a una altura de 10 m en bombas Lorentz.....	95

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Ficha Técnica del Panel Solar Guanyi GYP-180W	83
ANEXO 2: Ficha Técnica de la Bomba Solar Lorentz PS150.....	84
ANEXO 3: Valores Promedios Diarios Mensuales De Temperatura Máximas, Medias, Mínimas, Precipitación, Velocidad Y Dirección De Viento, Humedad Relativa Y Energía Solar (promedio 7 años, 2007 – 2014).....	85
ANEXO 4: Álbum fotográfico de la evaluación experimental	86
ANEXO 5: Datos registrados durante el periodo de evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico.....	89
ANEXO 6: Cuadros de cálculos de la necesidad de agua de los cultivos característicos de Yaurisque.	90
ANEXO 7: Potencial energético de radiación solar en el Perú. Pedro Zanabria Pacheco, X Simposio Peruano de Energía Solar. Noviembre 2003.....	91
ANEXO 8: Metodología del diseño para el sistema de bombeo fotovoltaico estudiado	92

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de localidades de la sierra del Perú tiene un gran potencial de tierras agrícolas donde se siembra cultivos transitorios por secano tales como el maíz, trigo, papa y haba, los cuales tienen un ciclo vegetativo menor a un año; sin embargo, solo se obtiene una siembra en épocas de lluvia (octubre - abril), puesto que en épocas secas (abril- setiembre) no se obtiene el caudal suficiente para su riego. No obstante, en estas épocas, existe una mayor radiación solar, la cual puede ser usada para alimentar los sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua subterránea y así poder llevar a cabo una segunda campaña.

Por otro lado, en las zonas alto andinas del sur del Perú, especialmente en los lugares aislados, existe poca accesibilidad a la electricidad y deficientes sistemas de captación de agua, por lo que la energía fotovoltaica representaría una alternativa rentable, debido a que es renovable, inagotable y limpia, además de que en la actualidad los costos de los módulos fotovoltaicos están disminuyendo significativamente, posibilitando su adquisición y uso.

En el distrito de Yaurisque, la población cuenta con un sistema de riego por inundación insuficiente e ineficiente para abastecer de agua al área de cultivo de la comunidad, y muchos beneficiarios se quedan sin posibilidades de riego, por ende, se busca implementar un sistema de riego tecnificado, entre ellos, el riego por aspersión, debido a que los agricultores ya conocen este sistema; además de que funciona adecuadamente con sistemas de bombeo solar.

En los sistemas de bombeo fotovoltaico es posible aprovechar las horas de mayor radiación solar para bombear el agua a un tanque elevado permitiendo el riego independiente de la energía solar del momento y ajustar el flujo del agua según el requerimiento hídrico de la cedula de cultivo.

Actualmente, la tecnología fotovoltaica disponible comercialmente es una alternativa real para su aplicación en riego agrícola, en zonas rurales alejadas de la red de electricidad pública; sin embargo, es necesario determinar si los sistemas de bombeo fotovoltaico trabajan con la misma eficiencia, por ello en esta investigación se evaluará un sistema de bombeo solar ya existente con la finalidad de determinar su real eficiencia.

1.1. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio busca analizar los factores que influyen en el funcionamiento del sistema de bombeo solar y su uso de manera eficiente, lo cual permitirá realizar de dos a tres campañas al año, logrando una mayor producción, beneficiando a la población y contribuyendo a lograr mayores ingresos y mejorando su calidad de vida.

Por consiguiente, se evaluó un sistema de bombeo fotovoltaico instalado en CECADE, así como los volúmenes almacenados, y su aplicación en un sistema de riego tecnificado de acuerdo al caudal generado, presión del sistema y la necesidad de agua de los cultivos agrícolas en el Distrito de Yaurisque.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico y determinar el volumen de agua diaria bombeada bajo las condiciones climáticas del distrito de Yaurisque, Paruro, Cusco.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular la eficiencia del módulo fotovoltaico bajo las condiciones climáticas con énfasis en la intensidad de radiación solar, y determinar la tendencia de los valores climáticos históricos con los medidos.
- Calcular la eficiencia de la bomba, y determinar el caudal suministrado bajo diferentes niveles de radiación solar y altura.

- Determinar la eficiencia total del sistema de bombeo fotovoltaico.
- Definir los cultivos que se adaptan a las condiciones de riego proveídas por el sistema de bombeo solar.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Los primeros sistemas de bombeo fotovoltaico se instalaron en España hace más de 30 años, las primeras instalaciones fueron realizadas en las comunidades rurales en 1978, después su producción fue en aumento llegando aproximadamente a más de 10.000 en 1994 y aproximadamente medio millón en el año 2010 (Universidad Internacional de Andalucía, 2011).

Actualmente, el bombeo solar es una tecnología popular, útil y rentable por su facilidad de uso en diferentes campos de aplicación como el suministro de agua a zonas remotas en donde no es accesible la energía eléctrica; llevar agua potable a las casas, abastecer agua para el ganado y para el riego, entre otros.

Los sistemas solares de bombeo pueden satisfacer un amplio rango de necesidades que van desde 1,000 litros diarios para abreviar pequeños hatos o para consumo humano, hasta 50,000 litros diarios para hatos más grandes e irrigación de pequeñas parcelas. Estos sistemas son modulares, de manera que pueden optimizarse para las características específicas de cada proyecto (FIRCO Y SWTDI, 2000).

En las zonas rurales se usan bombas a base de motores de combustión para extraer el agua subterránea, sin embargo, estos sistemas generan un desafío en las comunidades por su complejidad, su constante mantenimiento, la emisión de gases, sonido, y el costo que implica comprar y llevar el combustible hacia las zonas donde se encuentran los pozos, por lo cual se ha optado por fuentes de energía alternativa, entre ellas la energía solar.

Para captar esta energía se necesita de paneles solares, inicialmente sus costos eran elevados y actualmente han bajado significativamente, y a través de los años la inversión para la instalación de esta infraestructura también ha disminuido en un 80 por ciento con una vida útil de 20-30 años. Comparando estos dos sistemas, el costo de la inversión inicial del sistema de bombeo solar es más elevado, sin embargo a lo largo de la vida útil del sistema de bombeo los costos por concepto de reemplazo de piezas y mantención son considerablemente más bajos, en comparación con un sistema de combustión diésel que los costos del combustible son elevados, así como su mantenimiento, reparación y tiempo de vida corto, mientras que la energía solar es gratis. Obteniendo así con el sistema solar una disminución de costos para el acceso al agua usando energía limpia, disminuyendo las emisiones de CO₂ y contribuyendo positivamente al cambio climático (Banco Mundial, 2016).

2.2. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.2.1. LOCALIZACIÓN.

El equipo del sistema de bombeo fotovoltaico está ubicado en el Centro de Capacitación para el Desarrollo "Qosqo Yachay Wasi" (CECADE), en el distrito de Yaurisque, Provincia de Paruro, Departamento del Cusco. La zona de estudio (Ver Figura 1) se encuentra en las coordenadas 71° 51' 6,59" longitud Oeste y 13° 39' 37,24" latitud Sur a una altura de 3330 metros sobre el nivel del mar.

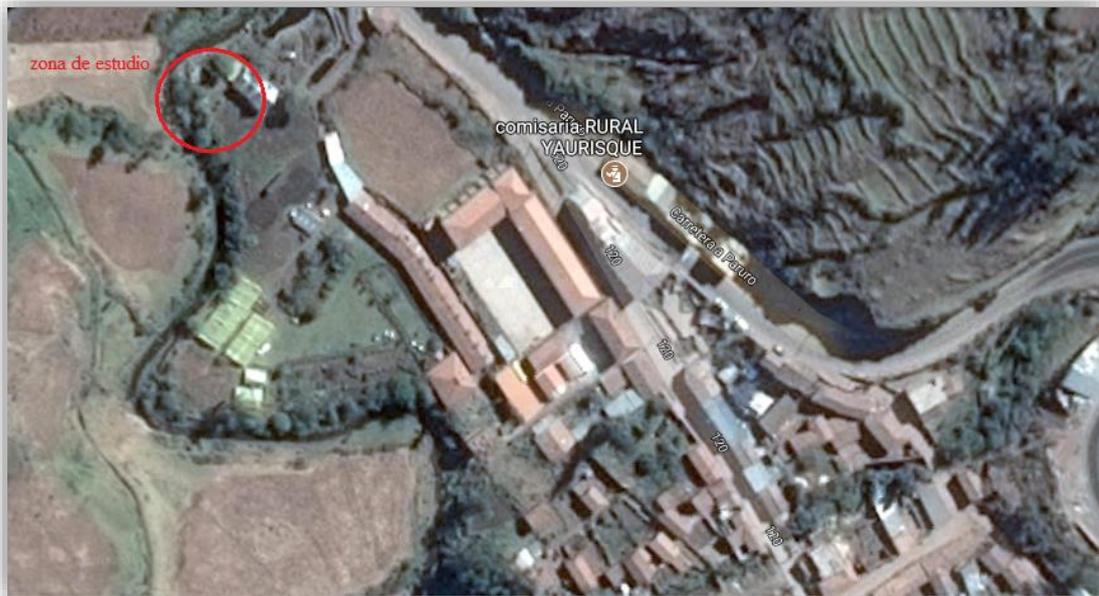


Figura 1: Mapa de la zona de estudio (CECADE).

Fuente: Google Maps (2017)

2.2.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.

Según la **Mancomunidad de municipalidades rurales “Hermanos Ayar”, 2007**, el lugar de estudio pertenece a la zona quechua, región de clima templado, y según su ubicación los elementos del clima presentan las siguientes características:

- La Temperatura media anual fluctúa entre 11° y 16°C desde 2300 hasta los 3500 msnm; las máximas entre 19°C y 29°C y las mínimas entre 4 y 7°C.
- La Humedad relativa media anual en la zona oscila entre 53% en el mes de septiembre y 70% en el mes de febrero con un promedio anual del 60%. Se muestra un mayor porcentaje de humedad o vapor de agua en la atmósfera de enero a marzo, disminuyendo para los meses de junio a octubre, debido al cambio de estación.
- La precipitación media anual es de 516 mm. La época de lluvias se inicia en el mes de septiembre y termina en el mes de abril, los meses de mayor precipitación pluvial son de diciembre a marzo alcanzando 409.7 mm, y 77 mm entre abril y noviembre.

- Las horas Sol en promedio presentan un total anual de 206.5 horas/año, con un máximo de 261.1 horas para el mes de Julio y 139.8 horas como mínimo que corresponden al mes de Febrero. Los valores medios diarios son los siguientes:

Horas de sol media diaria	= 6.88 horas/ día
Horas de sol máxima diaria	= 8.42 horas/ día (Julio)
Horas del sol mínima diaria	= 4.99 horas/ día (Feb)

De acuerdo con las consideraciones de los parámetros descritos y según la escala climática de Thortnwaite, se define a la zona de estudio con tipo de clima “Semiárido Cálido Con Nulo Exceso de Agua y Baja Concentración Térmica en Verano”.

Cabe mencionar que se usó la estación meteorológica del CECADE para mayor precisión de los factores climáticos evaluados.

2.2.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.2.3.1. ACTIVIDADES ECONÓMICAS.

Los pobladores del distrito de Yaurisque se dedican a distintas actividades, de las cuales la agricultura y la ganadería son las más importantes, también se dedican a la crianza de animales menores como cuyes y gallinas y al comercio, de acuerdo a sus necesidades venden sus productos y adquieren otros en el mercado. Los hombres de la zona se dedican a la albañilería, peones, obreros, entre otros trabajos en proyectos u obras de construcción. En el cuadro 1 se observa las principales actividades económicas (Municipio de Yaurisque).

Cuadro 1: Principales actividades económicas de la zona de Yaurisque, Cusco.

PRINCIPALES ATIVIDADES OCUPACIONALES		
DESCRIPCION	JEFES DE FAMILIA	%
ACT. PRINCIPAL	400	100
AGRICOLA	214	53.5
GANADERIA	58	14.5
COMERCIANTE	15	3.75
OBRERO	18	4.5
AMA DE CASA	80	20
OTROS	15	3.75
ACT. COMPLEMENTARIA	400	100
OBRERO	200	50
CRIANZA DE ANIMALES MENORES	160	40
OTROS	40	10
Total jefes de familia	400	100

Fuente: Equipo técnico Puriq Wayna (2015)

2.2.3.2. PRODUCCIÓN AGRÍCOLA.

En el distrito de Yaurisque, la cédula de cultivos es diversificada y está determinada por el clima y los tipos de suelo, entre otros. De acuerdo a las cifras de la campaña agrícola 2011-2016, proporcionadas por la Dirección Regional de Agricultura, la superficie sembrada de los cultivos en el año 2016 asciende a 1483 ha, de las cuales las áreas más destacadas son las destinadas a la siembra de cultivos de papa, maíz, haba grano seco, cebada grano y trigo.

En el cuadro 2 se observa la cédula de los cultivos, el área que ocupan y los meses de siembra de los cultivos más importante de la zona de Yaurisque, Cusco.

Cuadro 2: Cédula de cultivo en situación actual.

REFERENCIAS CULTIVOS	AREA		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
	ha	%												
PRIMERA CAMPAÑA														
PAPA SIEMBRA GRANDE	15.80	21.88	1.15	0.85							0.55	0.45	0.75	0.75
MAIZ AMILACEO	14.80	20.50	1.20	0.95	0.35					0.90	0.40	0.70	1.00	1.20
CEBADA GRANO	12.50	17.31	1.15	0.85							0.50	0.45	0.75	1.15
TRIGO	7.00	9.70	0.70	0.85	0.85	1.15					0.60	0.45	0.75	1.15
HABA	6.50	9.00	1.20	0.95	0.35							0.50	1.00	1.20
ARVEJA	3.60	4.99	1.10	0.90							0.30	0.70	0.70	1.10
TARWI	3.10	4.29	0.45	0.75	0.75	1.10	0.85	1.00	0.45					
OLLUCO	2.20	3.05	0.45	0.75	0.75	1.10	0.30							0.70
OCA	2.00	2.77	1.10	1.10	0.90							0.35	0.70	0.70
QUINUA	1.00	1.39	0.70	1.10	0.90							0.35	0.70	0.70
AVENA	2.40	3.32	1.15	1.15	0.25								0.85	1.15
ALFALFA	1.30	1.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
TOTAL	72.20	100.00												

Fuente: Municipalidad distrital de Yaurisque (2016)

2.3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.3.1. RADIACIÓN SOLAR.

El sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de 5, 500°C, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones que producen una pérdida de masa que se transforma en energía radiante. Esta energía se transmite al exterior mediante la denominada onda electromagnética. (Veritas, 2009, p. 29)

La radiación solar es la principal fuente de energía de nuestro planeta y determina sus características climatológicas. Llega a los límites superiores de la atmósfera, donde es dispersada, absorbida, y reflejada por las nubes al espacio o a la superficie de la tierra. La dispersión de la radiación por las partículas de aire es más efectiva para longitudes de onda muy cortas. En un día soleado con el cielo descubierto, se dispersa más de la mitad de la radiación en el rango azul (longitudes de onda corta cercanas a 0.45 µm) y muy poco en el rango rojo (alrededor de 0.65 µm). Los estimativos de la radiación que disgrega la atmósfera promedian cerca del 8% de la radiación solar incidente.

El Perú gracias a su favorable ubicación geográfica: cercanía al Ecuador y la gran altitud de gran parte de su territorio (Cordillera de los Andes) cuenta con elevados niveles de

radiación solar (700 a 1 000 W/m²), ofreciendo un gran potencial para su utilización en diferentes tecnologías. El conocimiento y análisis de la radiación solar disponible en un lugar determinado es indispensable para el diseño, construcción y evaluación de sistemas solares. (Zanabria, 2015, p.7)

2.3.2. LA ARQUITECTURA SOLAR.

El movimiento y la posición del sol en el transcurso anual, en una determinada localidad es un instrumento muy valioso para ubicar la posición del sol en cualquier época y hora del año. Los diagramas de trayectorias del sol se construyen en función de la latitud, longitud, declinación, ecuación del tiempo, duración del día, hora de entrada y salida del sol, altitud, azimut, entre otras. (Zanabria, 2015, p.14)

Un arreglo fotovoltaico recibe la máxima insolación cuando los rayos solares inciden perpendicularmente en él, para eso se necesita saber la trayectoria del sol durante todo el año y así realizar el ajuste de la inclinación de los paneles fotovoltaicos.

Los diagramas solares muestran la trayectoria del sol a lo largo del día, para distintos momentos del año y para una longitud concreta. Existen 2 tipos: (Zanabria, 2003)

- Diagrama Polar: Sistema de coordenadas, donde la posición de un punto está determinada por la distancia al centro y por el ángulo polar. En este diagrama la distancia desde el centro, mide la altitud solar, el círculo exterior en dicho diagrama de posición del sol representa el horizonte, es decir $\alpha=0^\circ$. El centro se identifica con la vertical encima de la localidad de observación. El ángulo de azimut del sol es idéntico con el ángulo polar en el diagrama posición del sol, medido desde el sur al este en las mañanas y hacia el oeste pasado el mediodía (Ver figura 2).

Este diagrama se usa para localizar el área de la trayectoria del sol, primero se debe ubicar el punto del tiempo del año en el que estamos, para esto, se entra por las líneas de las horas hasta que se intersectan con las del mes. Después se traza una línea desde dicho punto de intersección hasta el centro de la carta y se continúa hasta el círculo exterior, donde se halla el azimut. Finalmente con un compás ubicado en el centro de

la carta solar hasta el punto de intersección, se traza un arco hasta el eje vertical de la carta, para así hallar el ángulo de altitud.

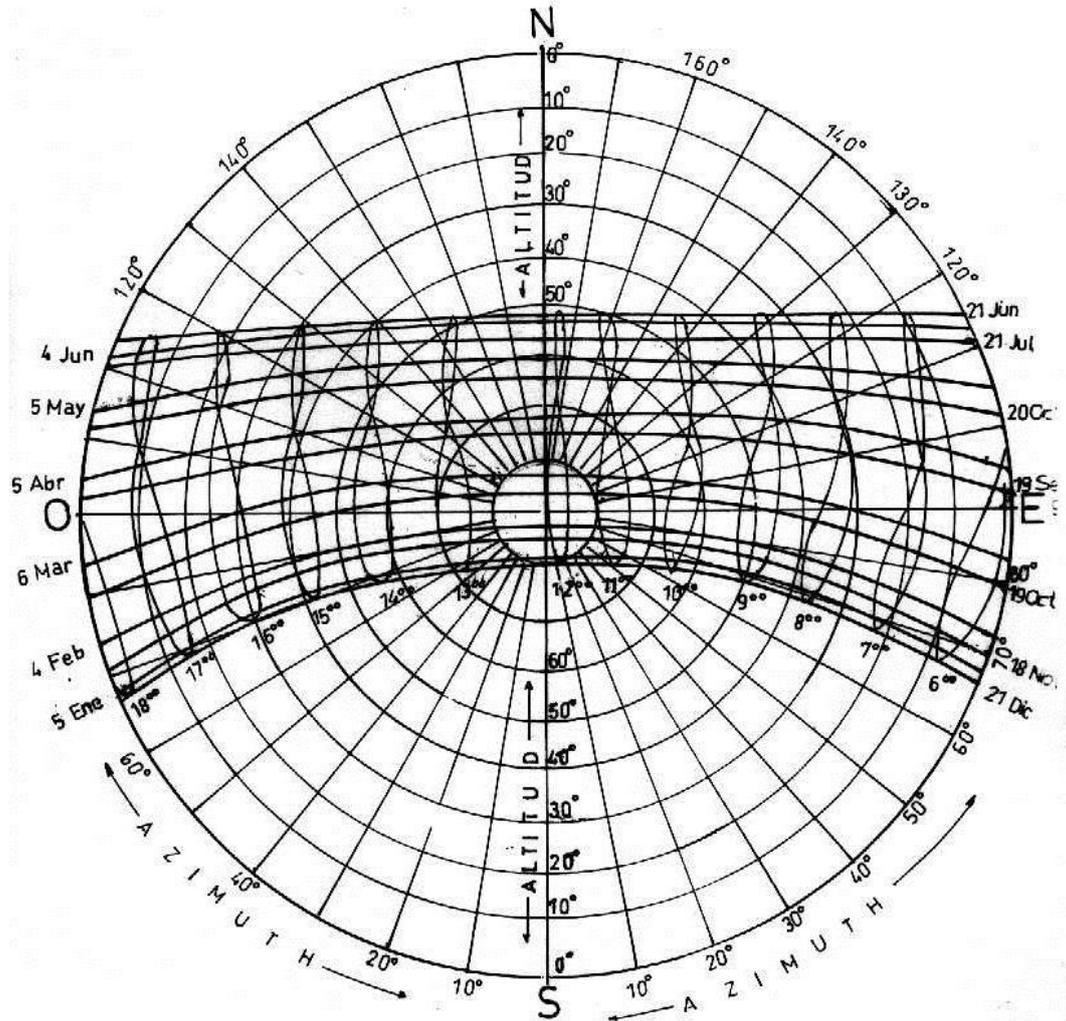


Figura 2: Diagrama Polar de trayectorias del sol.

Fuente: Zanabria P. (2003)

- Diagrama Cartesiano: Sistema de coordenadas, donde el eje horizontal representa el ángulo de azimut (φ), medido del respecto del N, hacia el E en horas de la mañana, y al O después del mediodía. En el eje vertical la altitud solar (α). (Ver figura 3)

Este diagrama se usa para calcular las “sombras”. Se ubica el punto del tiempo del año en el que estamos, entrando por las líneas de las horas hasta que se intersectan con las

del mes. El punto de intersección nos da el azimut en el eje de abscisas y el ángulo de altitud en el eje de ordenadas.

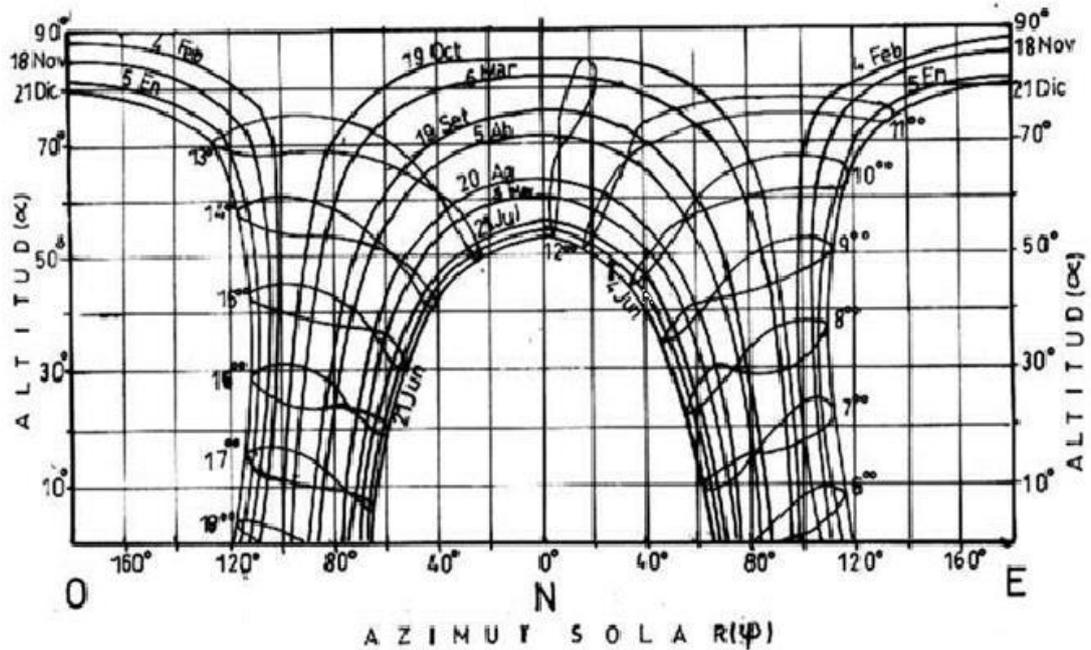


Figura 3: Diagrama Cartesiano de trayectorias del sol.

Fuente: Zanabria P. (2003)

Las figura 2 y figura 3 son las representaciones graficas de la posición solar para el Departamento de Cusco, ubicado a 13° 31' latitud sur (S), 71° 58' longitud oeste (O) y meridiano estándar 75° 00' O.

2.3.3. MOVIMIENTO DE LA TIERRA.

Según Mascarós (2016), la Tierra tiene dos tipos de movimiento: (Ver Figura 4)

- Movimiento de traslación: La Tierra se desplaza alrededor del Sol siguiendo una trayectoria elíptica. El plano que contiene esta trayectoria se denomina “plano de la eclíptica”. Debido a la excentricidad de la elipse, la distancia Tierra – Sol no se mantiene constante.

La distancia media entre la Tierra y el Sol es de 149 597 870 km. El punto más cercano se conoce como “Perihelio”, con una distancia de 0.938 ua. El punto más alejado se denomina “Afelio”, con una distancia de 1.017 ua.

- Movimiento de rotación sobre sí misma, alrededor de su eje polar, perpendicular al plano ecuatorial terrestre. El eje polar norte-sur forma un ángulo medio casi constante de 23.45° con la normal al plano de la eclíptica. Este ángulo cambia de forma continua entre 23.45° y -23.45° , siendo nulo en los equinoccios, máximo en el solsticio de verano y mínimo en el solsticio de invierno. Es el causante de la variación del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre, generando las estaciones.

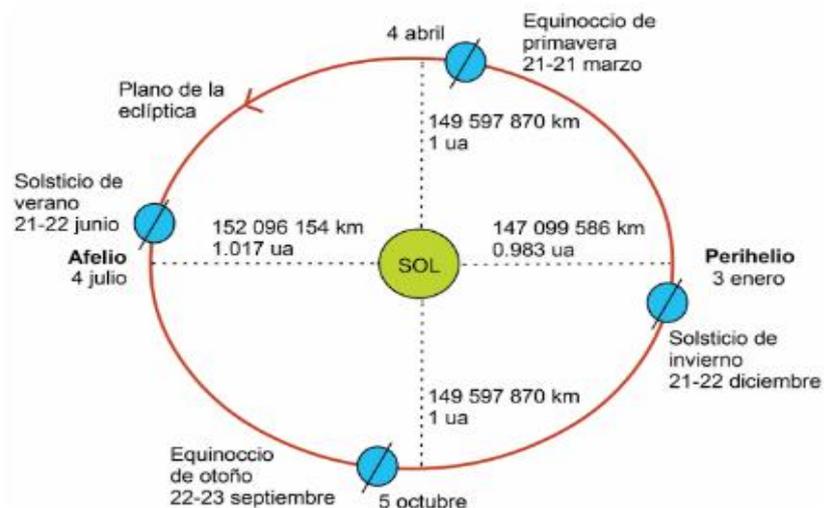


Figura 4: Movimiento de la Tierra respecto al Sol.

Fuente: Vicente Mascarós Mateo (2016)

2.3.4. APLICACIONES Y VENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR.

Según Veritas, Méndez y Cuervo (2009), la tecnología fotovoltaica es usada en zonas aisladas de la red de distribución eléctrica o de difícil acceso a ella; y sus principales aplicaciones son:

- Electrificación de sistemas de bombeo de agua, repetidores de TV y telefonía, etc.
- Electrificación de edificaciones aisladas: alumbrado, pequeños electrodomésticos.
- Alumbrado público aislado

- Balizado y señalización.
- Protección catódica.
- Conexión a la red eléctrica de pequeñas centrales eléctricas que permite disminuir las pérdidas en la red, ya que se acerca el consumo a la generación. Esta alternativa se está generando actualmente en mayor desarrollo.
- Bombeo solar fotovoltaico

Como ventajas del uso de esta tecnología tenemos:

- No produce polución ni contaminación ambiental.
- Silenciosa.
- Tiene una vida útil superior a 20 – 30 años
- Eficiencia que llegan a un 34% (sistemas de segunda generación)
- Resistente a condiciones climáticas extremas: granizo, viento, etc.
- No requiere mantenimiento complejo, solo limpieza del módulo solar y estado de baterías.
- Se puede aumentar la potencia instalada y la autonomía de la instalación, incorporando nuevos módulos y baterías respectivamente.
- No consume combustible.

2.3.5. PANEL FOTOVOLTAICO.

Los módulos o paneles fotovoltaicos son un conjunto de células conectadas convenientemente de forma que reúnan las condiciones compatibles con las necesidades y equipos existentes en el mercado. (Méndez, Cuervo, 2007)

2.3.5.1. ORIENTACIÓN DE LOS PANELES.

La mayor parte de la energía solar llega en línea recta, es por eso que los módulos fotovoltaicos deben estar orientados “de cara” al sol. Pero el sol no está quieto, por lo que se tiene que buscar algún criterio para determinar la orientación del módulo. Esta orientación está determinada por dos ángulos, el acimut α (ángulo que mide la desviación respecto al sur, en el hemisferio norte, y respecto al norte, en el hemisferio sur) y la

inclinación o elevación β (ángulo formado por la superficie del módulo y el plano horizontal).

- Azimut: Se debe tener el modulo orientado hacia el ecuador terrestre (es decir, hacia el sur en el hemisferio norte, hacia el norte en el hemisferio sur) para que durante el día el panel capte la mayor cantidad de radiación posible ($\alpha=0$)
- Inclinación: es la máxima altura que alcanza el sol cada día, varía según las estaciones, teniendo su máximo en el día del solsticio de verano y su mínimo en el solsticio de invierno. Se pueden dar dos inclinaciones, una para los meses de verano y la otra para los meses de invierno, aunque esto solo es recomendable si existe una gran variación en el consumo durante el verano.

Así pues, suele fijarse una β que maximice el ajuste entre la captación y la demanda de energía: (García, 1999)

1. Para instalaciones con consumos constantes a lo largo del año, es preferible optimizar la instalación para captar máxima radiación durante los meses invernales. Se utilizan inclinaciones iguales al valor absoluto de la latitud del lugar (ángulo ϕ) incrementado en 10° .
2. Para instalaciones con consumos inferiores en invierno puede utilizarse como inclinación el valor de la latitud del lugar, se optimiza, así, para los meses de primavera y otoño.
3. Para instalaciones que solo se usen en verano (por ejemplo riego) conviene emplear un ángulo igual a la latitud menos 10° .

En cualquier caso, se recomienda que la inclinación del panel nunca sea menor que 15° .

2.3.5.2. ARREGLOS FOTOVOLTAICOS.

Un arreglo fotovoltaico es un conjunto de módulos conectados eléctricamente en serie o paralelo. Las características eléctricas del arreglo son análogas a la de los módulos individuales, con la potencia, corriente y voltaje modificados de acuerdo al número de módulos conectados en serie y en paralelo. (Martínez, 2006)

- Para incrementar el voltaje: los módulos solares se conectan en serie para obtener voltajes de salida más grandes. El voltaje de salida de los módulos conectados en serie está dado por la suma de los voltajes generados por cada módulo. (Ver figura 5)

$$V = V1 + V2 + V3 + \dots$$

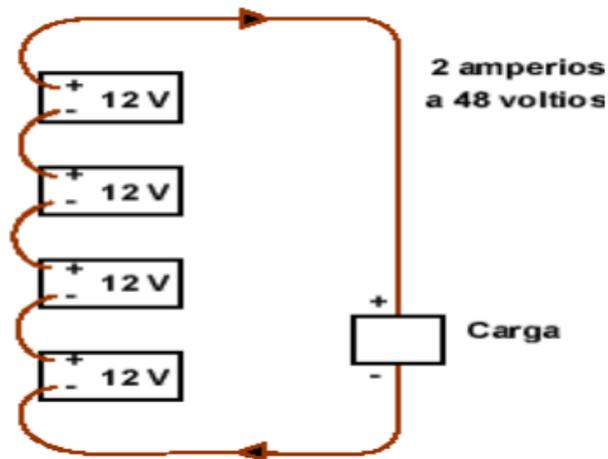


Figura 5: Conexión en serie de un sistema fotovoltaico.

Fuente: Domitilo Martínez Hernández (2006)

- Para incrementar la corriente: los módulos solares se conectan en paralelo para obtener corrientes generadas más grandes. El voltaje del conjunto es el mismo que el de un módulo; pero la corriente de salida es la suma de cada unidad conectada en paralelo. (Ver figura 6)

$$I_T = I1 + I2 + I3 + \dots$$

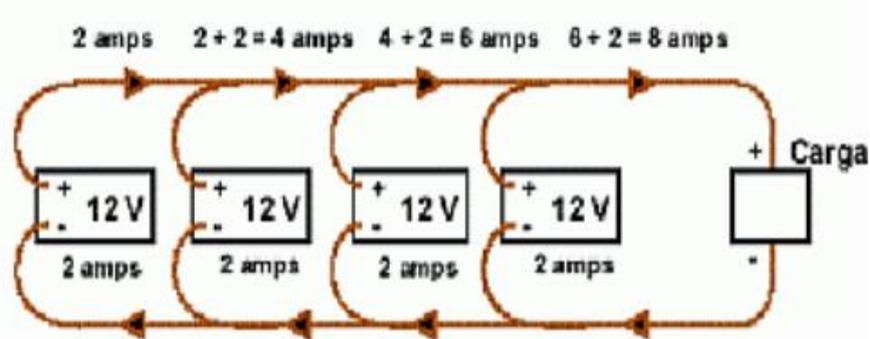


Figura 6: Conexión en paralelo de un sistema fotovoltaico.

Fuente: Domitilo Martínez Hernández (2006)

2.3.6. CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Según Fernández (2009), para el monitoreo de un panel solar, es necesario medir su eficiencia. La manera más completa de lograr este fin es a través de la medición de la curva característica **Corriente-Voltaje (I-V)** del panel solar, porque la curva I-V de un elemento fotovoltaico representa todos los posibles puntos de operación de corriente y voltaje, los cuales varían según las condiciones ambientales y también el estado del mismo panel.

Las curvas I-V dadas por los fabricantes están medidas bajo unas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El punto en concreto de corriente y voltaje en el que el dispositivo fotovoltaico trabajara vendrá determinado por la carga a la que esté conectado.

Para medir la curva I-V, se aumenta la resistencia o carga exterior y se mide la corriente y el voltaje de la carga. La figura 7 muestra las líneas de carga para diferentes valores de resistencia.

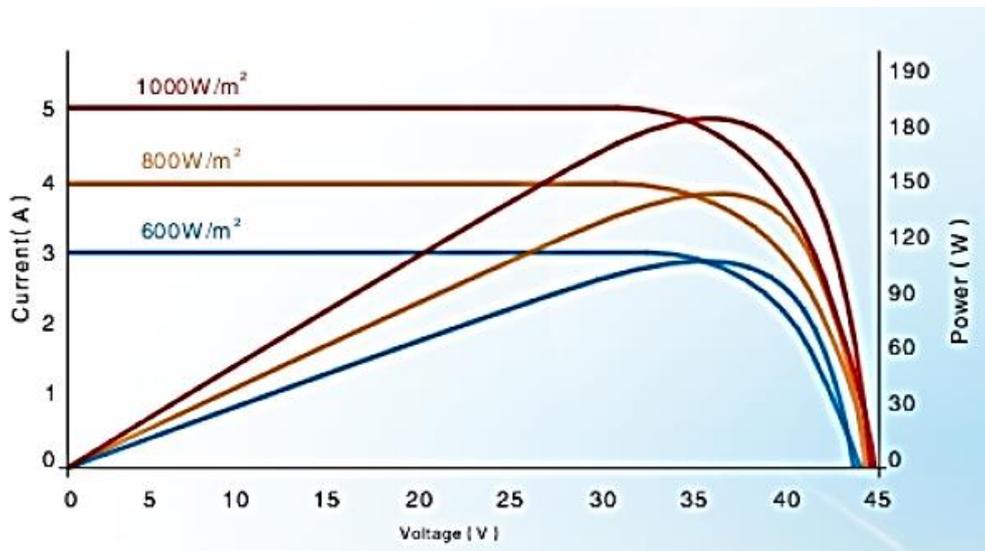


Figura 7: Curva característica de corriente – voltaje.

Fuente: Ficha Técnica Guangyi solar (2011)

Según Pranger (2015), cuando un panel se calienta debido a la luz solar, tanto la tensión en circuito abierto como la tensión del punto de máxima potencia se vuelven más bajas.

La intensidad sin embargo permanece prácticamente constante. En otras palabras: la curva intensidad-voltaje se mueve hacia la izquierda con el aumento de la temperatura tal y como se muestra en la figura 8.

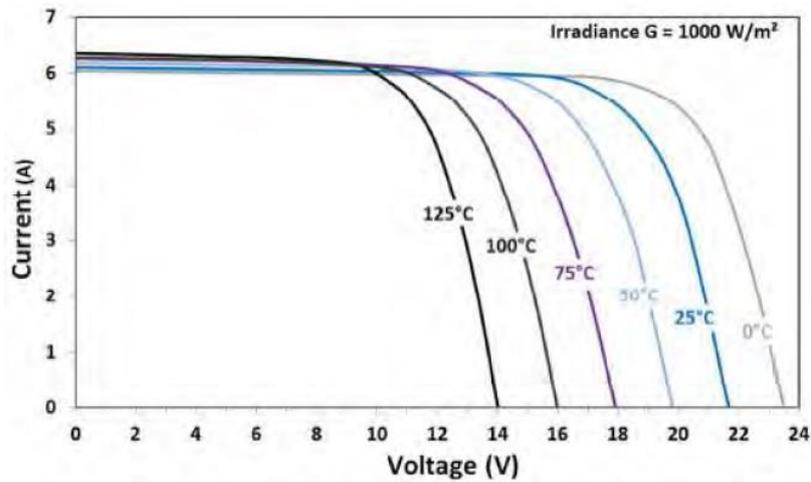


Figura 8: Efecto de la temperatura en la curva característica I-V.

Fuente: Marianka Pranger (2015)

De la misma manera, el punto de máxima potencia también se mueve hacia la izquierda, y hacia abajo porque el producto del voltaje y la corriente disminuyen al aumentar la temperatura. (Figura 9)

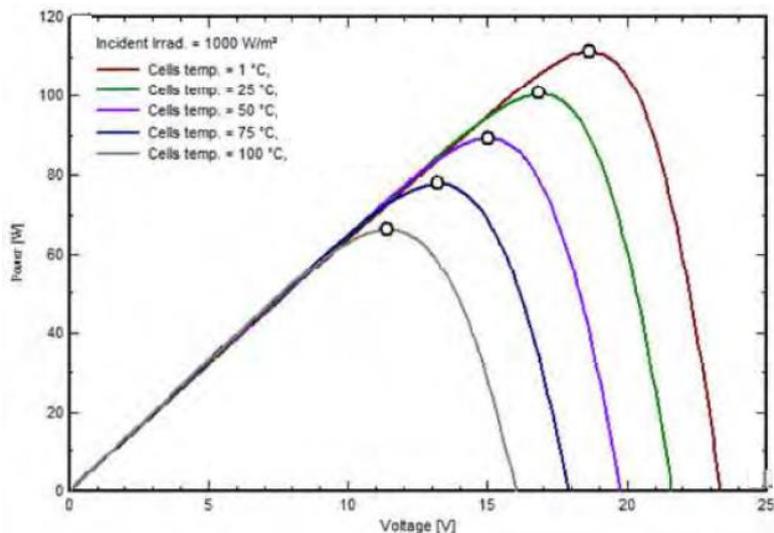


Figura 9: Efecto de la temperatura en el punto de máxima potencia.

Fuente: Marianka Pranger (2015)

2.3.7. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO.

Las células que se utilizan para construir el panel fotovoltaico deben tener los mismos parámetros eléctricos, los cuales son: (UNAM, 2012)

- Voltaje a circuito abierto (V_{ca}): Es el voltaje máximo que genera la celda solar. Este voltaje se mide cuando no existe un circuito externo conectado a la celda. Bajo condiciones estándares de medición, el valor típico del voltaje a circuito abierto que se ha obtenido en una celda solar de silicio cristalino es del orden de 0.600 V.
- Corriente a corto circuito (I_{cc}): Es la máxima corriente generada por la celda solar y se mide cuando se conecta un circuito exterior a la celda con resistencia nula. Su valor depende del área superficial y de la radiación luminosa. Normalmente se especifica en unidades de densidad de corriente.
- Potencia máxima (P_m): Su valor queda especificado por la pareja de valores de la corriente a máxima potencia y la tensión a máxima potencia, cuyo producto es máximo.
- La eficiencia de conversión de la celda, η , se define como el cociente entre el valor de la máxima potencia generada, P_m , y la potencia de la radiación luminosa, P_I (radiación por área de la celda).
- Factor de forma (FF): define la cuadratura de la curva Intensidad- Voltaje (I-V)

$$FF = \frac{P_m}{V_{ca} \times I_{cc}}$$

P_m	Potencia máxima,
V_{ca}	Voltaje a circuito abierto.
I_{cc}	Corriente a circuito abierto.

2.3.8. MATERIALES DE FABRICACIÓN.

Según la estructura del panel fotovoltaico se clasifican en (Alcalde, 2014):

- Silicio puro monocristalino: están compuesta de secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza, de gran grosor. Su rendimiento es aproximadamente un 16%, y en pruebas de laboratorio se puede obtener un rendimiento máximo de 24, 7%.
- Silicio puro policristalino: son secciones de barra de silicio estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales, de gran grosor. Se reconocen fácilmente por presentar un aspecto granulado. Su rendimiento es más bajo que los monocristalinos, aproximadamente un 14%, y en pruebas de laboratorio se obtiene un rendimiento máximo de 19.8%. Su costo es más bajo que el monocristalino.
- Silicio amorfo (TFS): son también células de silicio pero no tiene una estructura cristalina. Son paneles finos y flexibles y habitualmente se usan en pequeños dispositivos electrónicos y en paneles solares portátiles. Su rendimiento es aproximadamente de 13%, y en pruebas de laboratorio se obtiene un rendimiento máximo de 18%.
- Teluro de cadmio: su rendimiento en laboratorio es 16% y en módulos comerciales 8%.
- Diseleniuro de cobre en indio: su rendimiento en laboratorio es 17% y en módulos comerciales 9%.
- Arseniuro de Galio: es uno de los materiales más eficientes. Su rendimiento en laboratorio es 28% y en módulos comerciales 20%.
- Paneles Tándem: es una combinación de dos tipos de materiales semiconductores distintos. Cada tipo de semiconductor es capaz de sacar el máximo rendimiento en una parte del espectro electromagnético de la radiación luminosa, por ende se logra

aumentar el rendimiento de las células fotovoltaicas. Se consigue un rendimiento de 35% y teóricamente se puede obtener un rendimiento de 50% con la unión de 3 materiales.

- Paneles de cobre, indio, galio y selenio (CIGS): es una nueva tecnología, se trata de un panel muy fino, muy barato de producir y que presenta un mayor nivel de eficiencia de todos los materiales. Es favorable debido a su competitividad relación producción de energía/coste.

2.3.9. PRINCIPIOS DE CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA.

Según Sánchez et Al. (2017) La materia está constituida por átomos, los cuales a su vez están formados por dos partes bien diferenciadas: el núcleo, dotado de una carga eléctrica positiva y los electrones, con carga eléctrica negativa que compensa la del núcleo, formando de esta manera un conjunto eléctricamente neutro. Los electrones más externos se conocen como electrones de valencia.

Los semiconductores son utilizados en la fabricación de las celdas solares porque la energía que liga a los electrones de valencia al núcleo es similar a la energía que poseen los fotones que constituyen a la luz solar. Por lo tanto, cuando la luz solar incide sobre el semiconductor (generalmente silicio), sus fotones suministran la cantidad de energía necesaria a los electrones de valencia para que se rompan los enlaces y queden libres para circular por el material. Por cada electrón que se libera, aparece un hueco. Dichos huecos se comportan como partículas con carga positiva (+). Cuando en el semiconductor se generan pares electrón-hueco debido a la absorción de la luz, se dice que hay una fotogeneración de portadores de carga negativos y positivos, los que contribuyen a disminuir la resistencia eléctrica del material. Este es el principio básico de operación de las fotoresistencias.

En la Figura 10, se muestra una estructura simple de una celda solar en donde se ilustra el principio básico de la conversión fotovoltaica. La celda solar consiste en una unión de dos capas de materiales semiconductores tipo p y n con contactos eléctricos en la parte superior y en la inferior.

- Capa P: compuestas por las impurezas del boro en el silicio, generan una zona positiva, es decir tienen un electrón menos que el silicio, generan los huecos (+).
- Capa N: compuestas por las impurezas de fosforo en el silicio, generan una zona negativa, es decir tienen un electrón más que el silicio, generan electrones libres de carga (-).

El espesor de éste “sándwich” puede variar, desde menos de una micra para el caso de semiconductores muy absorbentes (caso del silicio amorfo), hasta unos cientos de micra para el caso de semiconductores de baja absorción (caso del silicio cristalino). La unión entre las capas n (lado negativo) y p (lado positivo) es la responsable de que se forme un campo eléctrico interno que radica principalmente en la unión.

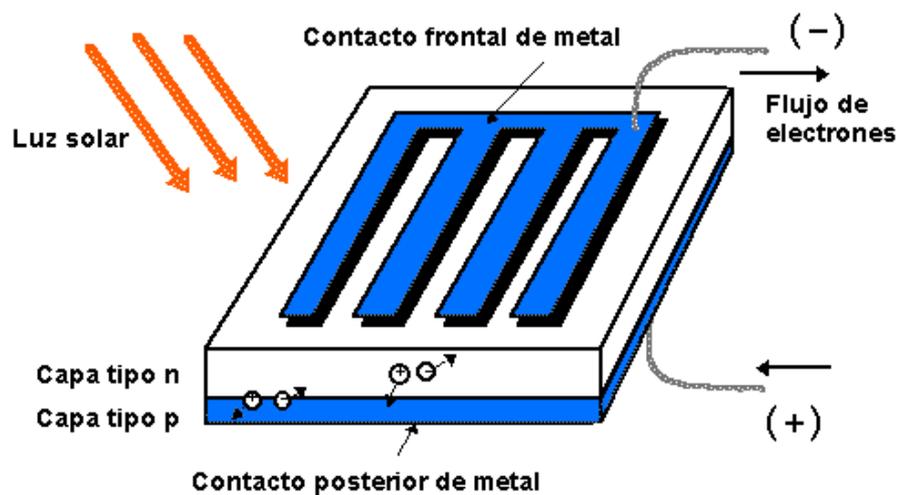


Figura 10: Generación eléctrica de una celda fotovoltaica.

Fuente: Luz Ángela Herrera Palacios (2014)

Cuando la radiación luminosa en forma de fotones es absorbida por los semiconductores se generan, en exceso de su concentración en equilibrio, pares de portadores de carga eléctrica, electrones y huecos, los cuales deben de ser separados para poder usar la energía que cada uno representa. Estos portadores foto-generados viajan bajo un gradiente de concentración hacia la unión en donde son separados por efecto del campo eléctrico. Esta separación envía electrones foto-generados a la capa n y huecos foto-generados a la capa

p, creándose una diferencia de potencial entre las superficies superior e inferior de las capas.

La acumulación de cargas en las superficies del dispositivo da como resultado un voltaje eléctrico medible externamente. Este voltaje fotogenerado es lo que se conoce como el efecto fotovoltaico. Si se establece un circuito eléctrico externo entre las dos superficies, los electrones acumulados fluirán a través de él regresando a su posición inicial. Este flujo de electrones forma lo que se llama una corriente foto-generada o fotovoltaica.

Bajo condiciones de circuito abierto (V_{ca}) el efecto fotovoltaico genera una diferencia de potencial entre la parte superior y la inferior de la estructura. Bajo condiciones de corto circuito, el proceso genera una corriente eléctrica (I_{cc}) que va de la parte positiva a la negativa (dirección convencional para la corriente eléctrica).

2.4. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE ELECTRICIDAD

2.4.1. LA CORRIENTE ELÉCTRICA (I).

Es la capacidad de flujo de electrones libres a través de un circuito y se designa, en general, por la letra I, que indica la intensidad del flujo de electrones; también es la cantidad elevada de electrones que pasa a través de un punto en un segundo. Se expresa en Ampere. (Harper, 2005)

2.4.2. VOLTAJE ELÉCTRICO O DIFERENCIAL DE POTENCIAL (V).

Según Harper (2005) la fuente de energía se conecta a través de las terminales de un circuito eléctrico completo, donde una terminal tiene carga negativa (-) por el exceso de electrones y la otra terminal tiene carga positiva (+) por la deficiencia de estos.

Los electrones en la terminal cargada positivamente se encuentran más espaciados y las fuerzas de repulsión que actúan entre ellos se reducen. Esta fuerza de repulsión es una forma de energía potencial o energía de posición.

Los electrones en un conductor poseen energía potencial y realizan un trabajo en el conductor poniendo a otros electrones en una nueva posición.

La energía potencial de los electrones libres en la terminal positiva terminan siendo menor que la terminal negativa; por lo tanto, hay una diferencia de energía potencial, la cual es la “diferencia de potencial”.

2.4.3. POTENCIA ELÉCTRICA (P).

En los circuitos eléctricos la capacidad de realizar un trabajo se conoce como la potencia; por lo general se asigna con la letra P y su unidad es el watt. (Harper, 2005)

Para calcular la potencia en un circuito eléctrico se usa la relación:

$$P = I \times V$$

Donde P es la potencia en watts, I es la corriente en amperes y V es el voltaje en volts.

2.4.4. ENERGÍA ELÉCTRICA.

La potencia eléctrica consumida durante un determinado periodo se conoce como la energía eléctrica y se expresa como watts-hora o kilowatts-hora; la fórmula para su cálculo sería: (Harper, 2005)

$$E = I \times V \times t$$

Siendo t el tiempo expresado en horas.

2.5. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE HIDRÁULICA

2.5.1. SUBSISTEMA DE MOTOR-BOMBA.

Según Alonso y Chenlo (2005), los subsistemas motor-bomba están formados por un motor que acciona una bomba de agua. En general, los motores pueden ser de corriente continua (DC) o de corriente alterna (AC). Las bombas pueden ser centrifugas o de desplazamiento positivo. Por su ubicación en el pozo los sistemas motor-bomba pueden ser sumergibles o de superficie. El equipo de bombeo marca Lorentz, usado en el presente estudio, tiene un motor DC y una bomba volumétrica tipo tornillo excéntrico.

2.5.1.1. MOTORES

Un motor es una máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica. Dependiendo del tipo de alimentación eléctrica, los motores pueden clasificarse básicamente en: (Alonso, Chenlo; 2005)

- Motores de corriente continua (DC): se caracterizan por su voltaje, corriente, velocidades nominales y por el par de motor. La potencia que puede desarrollar un motor es proporcional al par motor y a la velocidad. El par motor es proporcional al flujo inductor y a la intensidad de carga. La velocidad de giro del motor varía con el voltaje e intensidad de funcionamiento así como con el flujo magnético. Las ventajas de estos motores estriban en la posibilidad de operar sumergidos reduciendo el mantenimiento por no tener que reemplazar las escobillas y presentar un rendimiento elevado y un grado de fiabilidad semejante al de los motores AC de inducción. En general están bien diseñados para acoplarse directamente al generador FV cuando accionan bombas centrífugas sin necesidad de un inversor.
- Motores de corriente alterna (AC): Existe 2 tipos básicos de motores AC son motores de inducción asíncronos y síncronos. Los habitualmente utilizados en sistemas de bombeo FV son los motores de inducción asíncronos, sin embargo al ser usados con sistemas fotovoltaicos aumentan el coste económico debido a la necesidad de un inversor AC/DC.

Los motores AC se componen fundamentalmente de 2 partes, rotor y estator, y se caracterizan por su voltaje y potencia nominales, por su velocidad de giro, dependiendo de la frecuencia de la tensión de alimentación, y por el par motor. El par motor depende de la velocidad y de la corriente. El rendimiento de estos motores depende de la potencia activa de alimentación y de la carga.

2.5.1.2. BOMBAS

Una bomba es una máquina capaz de transformar energía mecánica en energía hidráulica. Según el principio de funcionamiento, las bombas se clasifican en: (Verónica Flores, 2011)

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico, en las que el principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, en estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. (de pistón, rotativa de pistones o bomba pistones de accionamiento axial).
- Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas, en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. (bomba de paletas, bomba de lóbulos, bomba de engranajes, bomba de tornillo).
- Bombas centrifugas, aprovecha el movimiento de rotación de una rueda con paletas (rodete) inserida en el cuerpo de la bomba misma. El rodete, alcanzando alta velocidad, proyecta hacia afuera el agua anteriormente aspirada gracias a la fuerza centrífuga que desarrolla, encañalando el líquido en el cuerpo fijo y luego en el tubo de envío.

2.5.2. CURVAS CARACTERISTICAS DE LAS BOMBAS SOLARES.

Según Damia Solar (2016), los equipos de bombeo con energía solar comienzan a trabajar cuando los paneles fotovoltaicos les suministran la energía mínima suficiente; proporcionando más agua cuanto más radiación solar reciben durante el día (5 a 8 horas diarias promedio). Este tipo de bomba dispone de un funcionamiento gradual, es decir, durante los primeros rayos del sol, la bomba empezará a arrancar de forma progresiva, incrementando su potencia hasta llegar al máximo funcionamiento durante las horas del mediodía (Figura 11). En cambio, las bombas comunes, dependiendo de la potencia dada, movilizan el agua en el menor tiempo posible. La potencia del motor es fija, es decir, no varía durante todo el funcionamiento de la bomba.

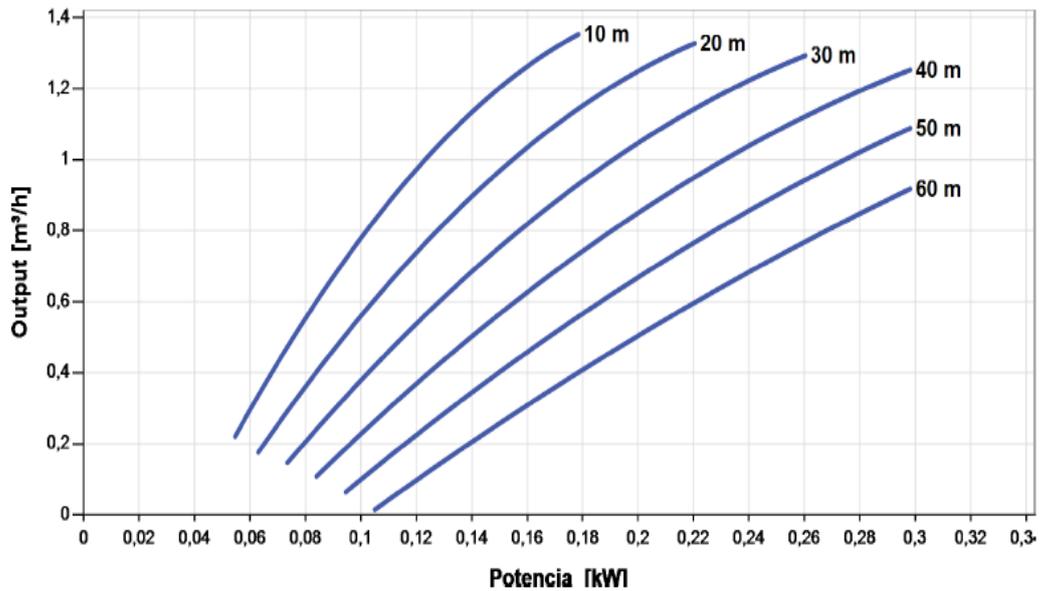


Figura 11: Curvas de funcionamiento de una bomba solar.

Fuente: *Ficha Técnica Lorentz (2016)*

También precisa que cada bomba de agua dispone de su curva de eficiencia (η), que indica por un lado la altura a la que se puede elevar el agua (H), y por el otro, el caudal de agua que puede mover la bomba (Q). A mayor altura de transporte del agua, menor será el caudal que genere, debido a la fuerza de gravedad. Mientras que si la altura es menor, mayor será el caudal de agua que ofrecerá la bomba. (Ver Figura 12)

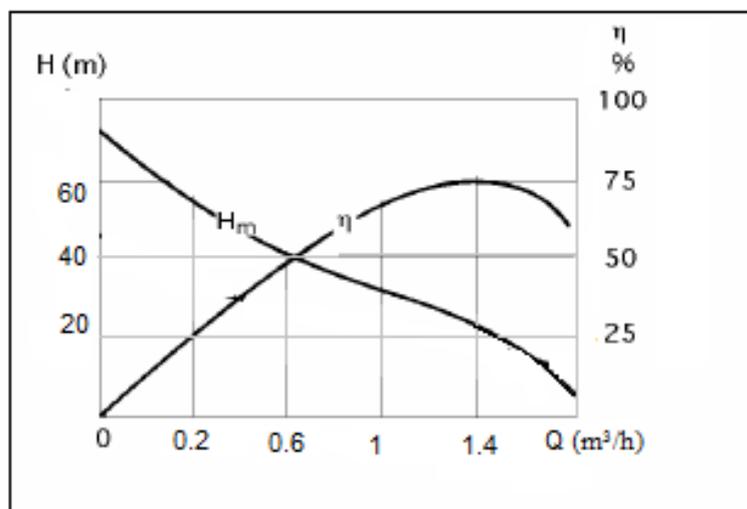


Figura 12: Curva de eficiencia de una bomba.

Fuente: *Universidad de Sevilla (2007)*

2.5.3. CARGA DINÁMICA TOTAL.

El tamaño del sistema de bombeo fotovoltaico está determinado por la carga dinámica total (CDT) y el volumen de agua diario necesario.

La carga dinámica total es la suma de la carga estática (CE) y la carga dinámica (CD):

$$CDT = CE + CD = (H_{ST} + \text{altura de la descarga}) + (\text{abatimiento} + H_f)$$

- Carga estática (CE): Es la distancia vertical que el agua se desplaza desde el nivel del espejo del agua antes del abatimiento del pozo hasta la altura de qué se descarga el agua. Es la suma del nivel estático (H_{ST}) y la altura de descarga.
- Carga dinámica (CD): Es el incremento de la presión causado por la resistencia del flujo de agua, debido a la rugosidad de las tuberías y componentes como codos y válvulas. La rugosidad depende del material usado en la fabricación de las tuberías. La carga dinámica se calcula según la distancia que recorre el agua desde la entrada a la bomba hasta el punto de descarga, teniendo en cuenta las distancias horizontales, material en la línea de conducción y su diámetro (mientras más estrechos, mayor resistencia).

2.5.4. PRINCIPALES COMPONENTES HIDRÁULICOS.

Según Bureau (2009):

- Nivel estático del agua (H_{ST}): Distancia vertical entre el nivel del suelo y el nivel del agua antes de la prueba de bombeo. Se mide en metros.
- Nivel dinámico del agua (H_{DT}): distancia vertical entre el nivel del suelo y el nivel final del agua después de la prueba de bombeo. Se mide en metros.
- Abatimiento: Es la distancia que baja el nivel del agua debido a la constante extracción. Se mide en metros.

- Caudal de Prueba (Q_T): Caudal de agua extraído durante la prueba de bombeo. Se mide en m^3/h .

- Caudal medio o aparente (Q_{AP}): Valor medio del volumen diario de agua requerido. . Se mide en m^3/h .

$$Q_{AP} = \frac{Q_D}{24}$$

- Altura de Fricción (H_f): Contribución equivalente en altura de las pérdidas por fricción en las tuberías para un caudal determinado.

- Altura del depósito (H_D): altura entre la parte superior del depósito de agua y el suelo.

- Volumen diario de agua requerido (V_d): se expresa en $m^3/día$. Es la cantidad de agua que debe ser bombeada diariamente por el sistema fotovoltaico.

- Eficiencia del motor-bomba (μ): cociente entre la energía hidráulica y la energía eléctrica consumida por el motor-bomba. Es adimensional.

- Energía hidráulica (E_H): Energía necesaria para bombear el volumen diario de agua requerido. Se expresa en Wh/día.

- Energía eléctrica consumida por el motor-bomba (E_{MB}): energía consumida por el motor-bomba. Se expresa en Wh/día.

- Altura de bombeo (H_{TE}): es un parámetro ficticio que incluye las características del pozo, las pérdidas de fricción en las tuberías y la variación del nivel dinámico del agua durante el bombeo. Se calcula usando la fórmula:

$$H_{TE}(\text{metros}) = H_D + H_{ST} + \left(\frac{H_{DT} - H_{ST}}{Q_T} \right) \times Q_{AP} + H_f$$

En la figura 13, se puede observar las variables descritas:

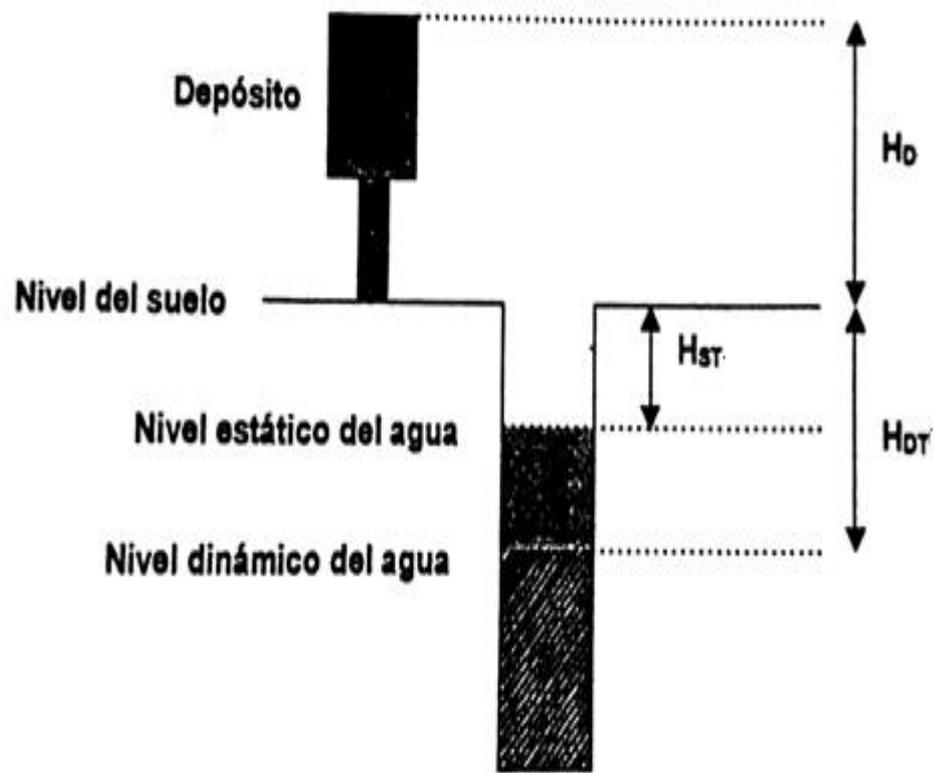


Figura 13: Principales componentes hidráulico de un sistema de bombeo de agua.

Fuente: Bureau Veritas Formación (2009)

2.5.5. CONTROLADORES.

El controlador gestiona las operaciones, analiza las entradas y optimiza constantemente el sistema para conseguir bombear y entregar la máxima cantidad de agua. Se encargan de mejorar el rendimiento de un sistema de bombeo solar, si está bien diseñado aumentan del 10 al 15% el rendimiento de la bomba. Los controles se usan con frecuencia en áreas con niveles de agua y/o condiciones atmosféricas fluctuantes. Los controles electrónicos consumen del 4 al 7% de la energía generada por el arreglo. Es común que las bombas FV se vendan junto con el controlador adecuado para operarlas eficientemente. Generalmente se usan controladores de potencia máxima (los cuales operan el arreglo cerca de su punto de potencia pico). (Lorentz, s.f.)

2.6. BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.6.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

Según Raboso (2013) se define como sistema fotovoltaico, al conjunto de componentes eléctricos, electrónicos, mecánicos, utilizados en el aprovechamiento de la energía solar disponible para su transformación de energía eléctrica a energía hidráulica. Dependiendo de su configuración y potencia producida.

Un sistema de bombeo fotovoltaico es un sistema autónomo, en el cual se tiene una carga conocida. Actualmente, son diseñados para diversas necesidades desde pequeños sistemas (50 – 60 W) hasta los más grandes (7.5 -10 kW).

Según Maupoux (2010), menciona que antiguamente, la eficiencia típica de energía solar a energía hidráulica era alrededor de 2% con una eficiencia de los paneles fotovoltaicos de entre 6 – 8% y del motor de la bomba del 25%. Actualmente, las bombas solares pueden tener una eficiencia media de energía solar a energía hidráulica de más del 9%.

El mencionado autor, señala que un buen sistema (motor-bomba y paneles fotovoltaicos) debe tener una eficiencia de energía eléctrica a hidráulica de alrededor del 70% usando **bombas de tornillo** o tipo de bomba hidráulica considerada de accionamiento positivo. Con bombas de diafragma la eficiencia estará alrededor del 45% y con bombas centrífugas alrededor del 20%.

La eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico es el resultado del producto de la eficiencia del motor-bomba por la eficiencia del panel fotovoltaico.

2.6.2. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.

La instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico es relativamente sencillo, pero fundamental para su éxito a largo plazo. Se debe tener en cuenta el tipo de bomba y los paneles solares que se utilizaran, la elección depende del caudal requerido diario, la carga dinámica total y la irradiación solar de la zona (David Cruz Baldán, 2011). Este sistema

está compuesto principalmente por un generador fotovoltaico, un motor/ bomba, un pozo, un sistema de tuberías y un depósito de acumulación (tanque elevado), como se puede ver en la figura 14.

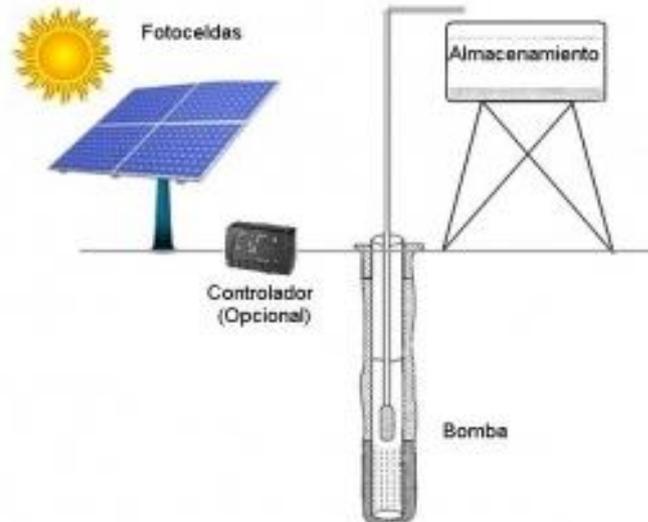


Figura 14: Esquema de un sistema solar para bombeo de agua.

Fuente: Energía Alternativa de México (2000).

Las funciones de los principales equipos son: (CECADE, s.f.)

- Paneles solares: compuesto de células solares de silicio, que transforman la energía solar en energía eléctrica para alimentar la bomba y suministrar el agua al tanque elevado. Los sistemas o arreglos FV tienen una vida media de 20 – 30 años y potencias entre 100 y 1500 W. Se debe conocer las características eléctricas (corriente - tensión), donde cada curva se obtiene para un valor específico de irradiación y temperatura. Los parámetros básicos a conocer son la corriente en corto circuito, tensión en circuito abierto y los puntos de máxima potencia.
- Bomba sumergible: el tipo de bomba seleccionado está en función de la carga dinámica total del sistema de bombeo y el volumen de agua requerida. Debe suministrar el caudal mínimo requerido, cada bomba viene con tablas y gráficas dadas por el fabricante.

- Tanque elevado: mantener la presión uniforme, almacenar el agua para un servicio de abastecimiento en época de sequías o cuando existe poca radiación solar y la bomba no pueda trabajar.

2.6.3. APLICACIONES DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.

Existen diversas aplicaciones para los sistemas de bombeo alimentados por energía solar, pero entre las principales aplicaciones tenemos: (David Cruz Baldán, 2011)

- Para sistemas de riego agrícola: la necesidad de agua depende de la estación y el tipo de cultivo que se pretende regar. La demanda de agua en los meses secos puede tener valores pico de 100 m³/día/ha y en los meses de lluvia, los volúmenes son próximos a cero.

En los países de desarrollo, las necesidades de agua de los pequeños agricultores por hectárea están entre 1 a 5 l/s, por ende, las bombas deben tener una capacidad de rango entre los 150 a 500 W para suministrar agua para regar entre 0.5 y 1 hectárea, dependiendo del cultivo y rendimiento del sistema de distribución de agua.

- Abastecimiento de agua en zonas rurales: existe una demanda de agua casi constante a lo largo del año, puede ser para consumo humano o de animales de granja.

Los animales en edad madura, necesitan aproximadamente desde 0.1 l/día de agua para un ave de corral hasta 50 l/día de agua para un caballo. En cambio, para el consumo humano las necesidades de agua son variadas dependiendo de la localización y el estilo de vida, sin embargo, se estima un aproximado de 20 a 40 l/día/persona de agua para poder cumplir con las necesidades básicas. Esto supone una potencia hidráulica de 0.3 W para un periodo de utilización de 8 horas y una elevación del agua de 20 metros.

2.6.4. MÉTODOS DE RIEGO CON SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.

Mejorar los sistemas de riego es, sin duda, un objetivo importante para modernizar el agro nacional, por eso se debe innovar las técnicas de riego para un uso más eficiente del agua.

Según las cifras del IV Censo Nacional Peruano Agropecuario de 2012, el riego por gravedad es utilizado en más de 1590.5 mil hectáreas, significando el 88% del total, el 7% del total utiliza riego por goteo y el 4.8% el sistema por aspersión. Según zona geográfica, la superficie bajo riego por gravedad predomina en la Costa y Sierra representando el 83.3%, por goteo y exudación en la Costa el 6.9% y por aspersión en la Sierra el 3.4% del total de hectáreas.

En el cuadro 3 se muestra una representación general de la idoneidad de los principales sistemas de riego con bombas accionadas mediante energía solar, aunque estos pueden variar según el tipo de cultivo.

Cuadro 3: Métodos de riego para uso con bombeo solar.

Método de distribución	Rendimiento de la aplicación típica	Altura Típica	Idoneidad para uso con bombas solares
Canales abiertos	50-60%	0.5-1 m	Si
Aspersor	70%	10 – 20 m	No
Goteo	85%	1-2 m	Si
Inundación	40-50%	0.5 m	No

Fuente: Green Empowerment, Michel Maupoux (s.f.)

Los sistemas de riego más usados son: (Patricio Méndez/Juan Inostroza, 2011)

- Canales abiertos o surcos: el agua corre a través de pequeños canales que se ubican a las hileras del cultivo, se alimenta de una tubería a baja presión o una manga de riego. En los surcos el agua se infiltra en el suelo de forma vertical y lateral. Este método de riego se adapta especialmente a cultivos sensibles a la humedad en el cuello y que se cultivan en línea.

- **Aspersión:** El agua es distribuida a través de aspersores, los cuales producen gotas de agua de diferentes tamaños, imitando una precipitación natural. Usa aproximadamente el doble de agua que el sistema de goteo.
- **Micro aspersión:** Es una modificación del sistema de aspersión tradicional que permite asperjar el agua a poca distancia de la planta y de manera localizada. Consume menos agua que el sistema de aspersión tradicional, especialmente en cultivos de espaciamiento amplio, en los cuales el riego localizado es mucho más eficiente.
- **Goteo:** El agua es distribuida de manera localizada, por gotas, a través de goteros instalados en mangueras de goteo, pequeños reservorios como tanques elevados o tuberías de distribución. Es el más eficiente en el uso del agua, principalmente si se trata de cultivos de espaciamiento amplio; consume poco y por ofrecer una distribución lenta los cultivos suelen aprovecharla mejor.
- **Inundación:** El agua es distribuida superficialmente sobre el terreno de regadío, inundándolo totalmente o en partes. Es el que más consume agua, por lo tanto, con excepción de las vegas de los ríos, donde no hay altura para instalar otros sistemas por gravedad, los sistemas por inundación deberían ser evitados, principalmente donde el agua es escasa.

2.6.5. DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.

El diseño del sistema de bombeo pasa por evaluar, en primer lugar, los recursos locales y las necesidades de agua y, en segundo lugar, su implementación física. En consecuencia las fases son las siguientes: (CECADE, s.f.)

1. Determinación de la demanda de agua.
2. Determinación de la carga dinámica total.
3. Determinación de la radiación solar de la zona.
4. Selección de la bomba y de los paneles solares.

En cuanto a los factores que influyen el diseño del sistema son: (Raboso, 2013)

- Las condiciones hidráulicas, como la profundidad del pozo y la elevación sobre el nivel de extracción del agua (tanque elevado), las características fisicoquímicas del agua y las pérdidas por tuberías y/o accesorios.
- La energía producida por el generador fotovoltaico.

Por ende existen dos alternativas en el diseño de una instalación fotovoltaica aislada para bombeo de agua: el bombeo solar directo o bombeo solar con uso de baterías. En el bombeo solar directo, únicamente se bombea agua cuando se tiene radiación solar disponible, pero esta se puede suplir con la utilización de depósitos de almacenamiento, mientras en los sistemas de bombeo solar con uso de baterías, la energía eléctrica es almacenada en forma de energía electroquímica reutilizable en periodos en los que no se dispone de radiación. La inclusión de sistemas de baterías para almacenar energía permite un bombeo controlado en el tiempo. En el cuadro 4 se hace una comparación de los diferentes arreglos de sistemas de bombeo fotovoltaico.

Cuadro 4: Tipos de sistemas de bombeo fotovoltaico.

Sistema de bombeo solar	Ventajas	Desventajas
Arreglo A: Bomba de corriente continua	<ul style="list-style-type: none"> - No requieren baterías. Siempre bombean cuando hay radiación solar. - Las bombas son más eficientes que las bombas tipo AC. - Requieren menos módulos fotovoltaicos. - Bombas de buena calidad con una larga vida (más de 20 años) 	<ul style="list-style-type: none"> - No se puede usar bombas ya instaladas. - No se puede usar la energía para otros fines. - Hay pocos fabricantes de calidad a nivel mundial. - Las reparaciones tienen que hacerlas técnicos especializados. - Los repuestos pueden durar poco tiempo y ser costosos.

Continuación...

Sistema de bombeo solar	Ventajas	Desventajas
Arreglo B: Bombas AC con inversor especial.	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere baterías. Bombean cuando hay radiación. - Se puede usar las bombas ya instaladas. - Técnicos locales para realizar el mantenimiento y reparaciones de las bombas. - Precios accesibles. 	<ul style="list-style-type: none"> - No se puede usar la energía para otros fines. - La eficiencia depende de la calidad de las bombas, aproximadamente un 50%. - Las reparaciones del inversor pueden ser caras.
Arreglo C: Bombas AC con un sistema solar con baterías.	<ul style="list-style-type: none"> - Bombas existentes se pueden usar. - Se pueden usar bombas comunes. - La reparación de las bombas pueden hacerla técnicos locales. - Los repuestos están disponibles localmente. - Un sistema central puede alimentar varias bombas. - La electricidad generada se puede usar para otros fines. - Se puede apoyar el sistema con una fuente exterior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren baterías para generar y mantener la red. - La eficiencia de las bombas depende de su calidad y es aproximadamente el 50%. - La adaptación de las bombas a la disponibilidad de electricidad es más complicado. Requieren según el uso variadores de frecuencia.

Fuente: IDEA (2012)

En general, si se requieren altas potencias se recomienda el uso de bombas de corriente alterna, mientras para aplicaciones de pequeñas dimensiones los motores de corriente continua pueden ser más adecuados, al no requerir inversores. En el presente estudio se está usando el arreglo A: sistema de bombeo fotovoltaico con bomba de corriente continua. En la figura 15, se muestran los 3 arreglos de sistemas de bombeo solar existentes en la actualidad.

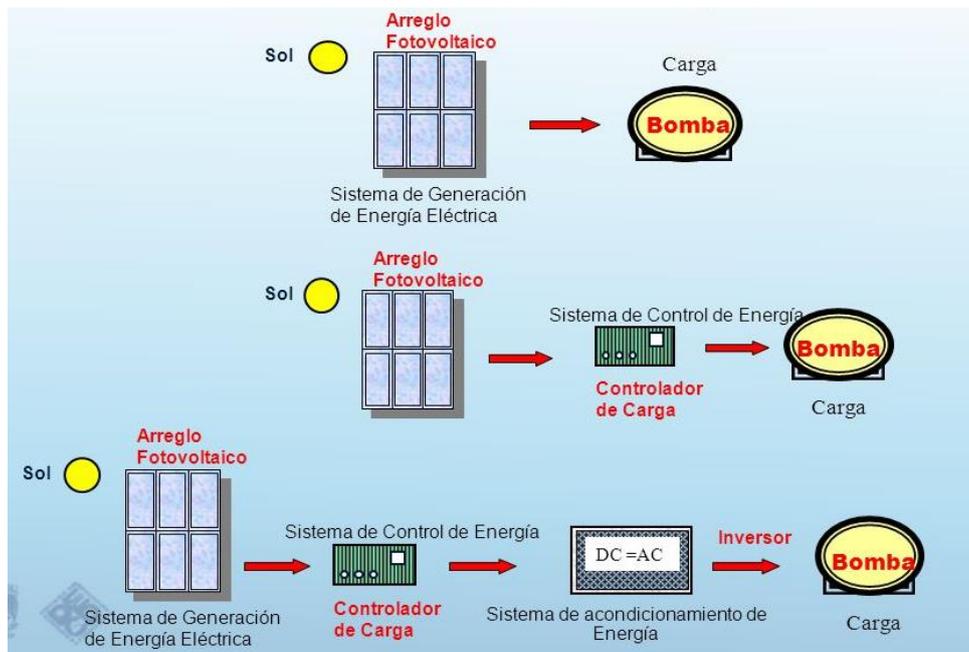


Figura 15: Arreglos de sistemas de bombeo solar.

Fuente: Aarón Sánchez Juárez (2011)

2.7. ANÁLISIS ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

Delta Volt (2010), señala que la excelente radiación en el Perú, especialmente en la zona del sur que es considerada de mayor radiación del mundo, y la reducción de los precios de los sistemas fotovoltaicos permiten reemplazar gran parte de los generadores por combustible con energía solar. A pesar de la inversión inicial considerable, la ausencia de gastos corrientes para combustibles, un mantenimiento muy reducido y su larga vida, los vuelven frecuentemente económicamente más viables.

En un sitio de buena radiación con los precios actuales del diesel (a pesar de su reciente reducción), el tiempo de amortización puede ser de seis años. La vida de un sistema solar frecuentemente es más de 20 años hasta 30, solamente hay que cambiar baterías (si las hay).

Una idea muy aproximada sobre los rangos de precios: desde un tamaño de bombeo de 20 hp, cada hp generado por energía solar completo cuesta en un sitio de buena radiación entre 2500.-US\$ para un sistema sin baterías, y 4700.-US\$ para un sistema con baterías

que también puede generar electricidad para otros fines, ejemplo agua doméstica. Cuanto más grande el tamaño, el precio disminuye, mientras más pequeño, el costo por hp es más elevado. (Ver cuadro 5).

Cuadro 5: Años de vida útil de equipos de sistemas Fotovoltaicos y sistemas de combustión interna.

Componente	Vida útil (años)	Mantenimiento
Arreglo FV y estructuras	20+	Ninguno
Controlador de potencia FV	10+	Ninguno
Motor/bomba centrífuga sumergible	7-10	Ninguno o limpiar los impulsores
Bomba centrífuga superficial	7-10	Ninguno
Motor/bomba de diafragma sumergido CC	3-5	cambio de diafragmas cada 5 años
Generador diesel (10 kW)	5-7	aceite, filtros, afinación anual
Motores (3 a 5 Hp)	3-4	aceite, filtros, afinación anual
Motores (6 a 10 Hp)	4-6	aceite, filtros, afinación anual

Fuente: Sandia National Laboratories (2000)

También es importante considerar en los costos, el precio del carbono (bonos de carbono) que se deja producir en reemplazo de los grupos diésel. Entre el año 2004 y 2009 en el mercado de carbono, el costo ha variado entre los 5\$ y los 22\$ y al calcular el valor promedio nos resulta ser US\$ 13, por lo que se determina que la venta de bonos de carbono, a largo plazo; se convierte en un incentivo importante al recuperar un nivel significativo de los costos y la inversión de usar un sistema de bombeo alimentado con energía solar. (Andrade y Pérez, 2009).

2.8. ANÁLISIS DE LA DEMANDA HÍDRICA DE CULTIVOS

Para analizar la demanda de agua para riego se debe tener en cuenta: (Municipalidad Distrital de Yaurisque, 2016)

- Evapotranspiración Potencial del Cultivo (Eto): Es la cantidad de agua consumida, durante un determinado periodo de tiempo, en un suelo cubierto de una vegetación homogénea, densa y en plena actividad vegetativa. Se expresa en mm/día. En el presente estudio se usó el método de Hargreaves.

$$Eto = 0.0023 \times Ra \times (Tm + 17.8) \times \sqrt{TD}$$

Dónde:

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

- Factores de cultivo (Kc): Indica el grado de desarrollo o cobertura del cultivo, depende de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de cada cultivo, expresa la capacidad que tienen las plantas para extraer agua del suelo en las distintas etapas del periodo vegetativo. No posee unidades.
- Evapotranspiración real del cultivo (UC): Es el consumo real de agua por los cultivos; varía de acuerdo al estado de desarrollo de las plantas (periodo vegetativo), se expresa en mm/día.

$$UC = Eto \times Kc$$

- Precipitación efectiva (P. Efec.): Es la cantidad de agua que aprovecha la planta, del total de la precipitación de lluvia registrada, para cubrir sus necesidades parcial o totalmente. Se expresa en mm.
- Requerimiento de agua (Req): También llamado déficit de humedad, está considerado como la lámina adicional de agua que se debe aplicar a un cultivo para satisfacer sus necesidades, se expresa en mm/día.

$$Req = UC - P.Efec.$$

- Eficiencia de riego (Ef. Riego): Es el factor de eficiencia del sistema de riego, indica cuan eficientemente se está aprovechando el agua. Los valores varían entre las diferentes modalidades de riego. No tiene unidades. En este estudio se usó riego por goteo (85%).

- Requerimiento volumétrico neto del agua (Req. Vol. Neto): Se expresa en m³/Ha/día.

$$Req.Vol.Neto = \frac{Req}{Ef. Riego} \times 10$$

- Área total de la parcela: Es la cantidad de terreno a irrigar con el proyecto. Se determina según el balance hídrico de la oferta de agua del sistema de bombeo fotovoltaico y la demanda de agua del cultivo. Se expresa Ha o m².

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO

- Instrumentos de medición: Un solarímetro y 2 multímetros digitales
- Estación meteorológica para la obtención de datos climáticos.
- Un módulo o panel solar monocristalino:

Modelo	: GYP - 180M
Potencia Máxima	: 180 W
Tensión en circuito abierto	: 43.2 V
Corriente Corto Circuito (Isc)	: 5.6 A
Voltaje en la potencia máxima	: 36 V
Corriente en el punto máximo	: 5 A
Máxima tensión del sistema	: 1000 V
Peso	: 15.5 Kg.
Dimensiones	: 1580 x 808 x 35 mm.



Foto 1: Panel Solar Guanyi GYP-180M.

3.1.2. SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO

- Fuente de agua: Pozo de forma cilíndrica (1,60 m de diámetro, 6 m de profundidad) que se alimenta por filtración natural.
- Tanque elevado de 2.5 m³ de capacidad ubicado en una estructura de madera.

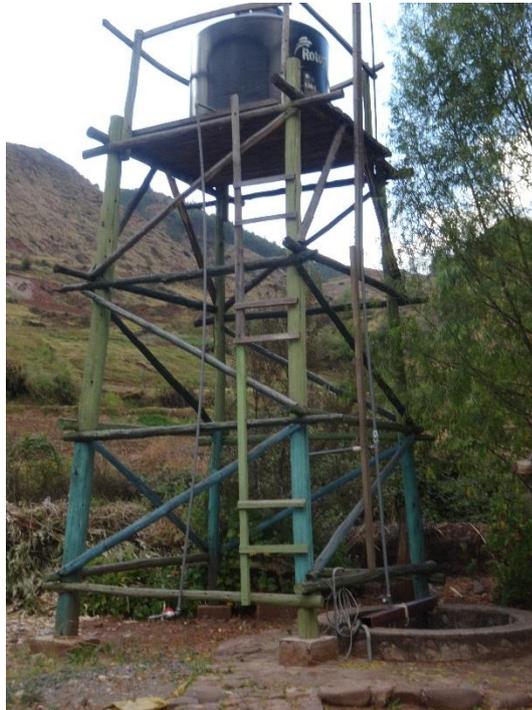


Foto 2: Estructura de madera del tanque elevado.

- Tuberías PVC 1" y 3/4".
- Válvulas.
- Instrumentos de medición: Wincha 8m y un medidor de caudal (balde graduado 15 litros).
- Una bomba sumergible:
 - Modelo : Lorentz PS150 HR- 07S
 - Altura máxima : 60 m.
 - Flujo máximo : 1.4 m³/h
 - Peso : 10 kg.
- Controlador de bomba:
 - Modelo : PS150
 - Potencia máxima : 0.3 kW.
 - Corriente del motor máxima : 18 A
 - Voltaje de entrada : 50 V.

3.2. PROCEDIMIENTOS

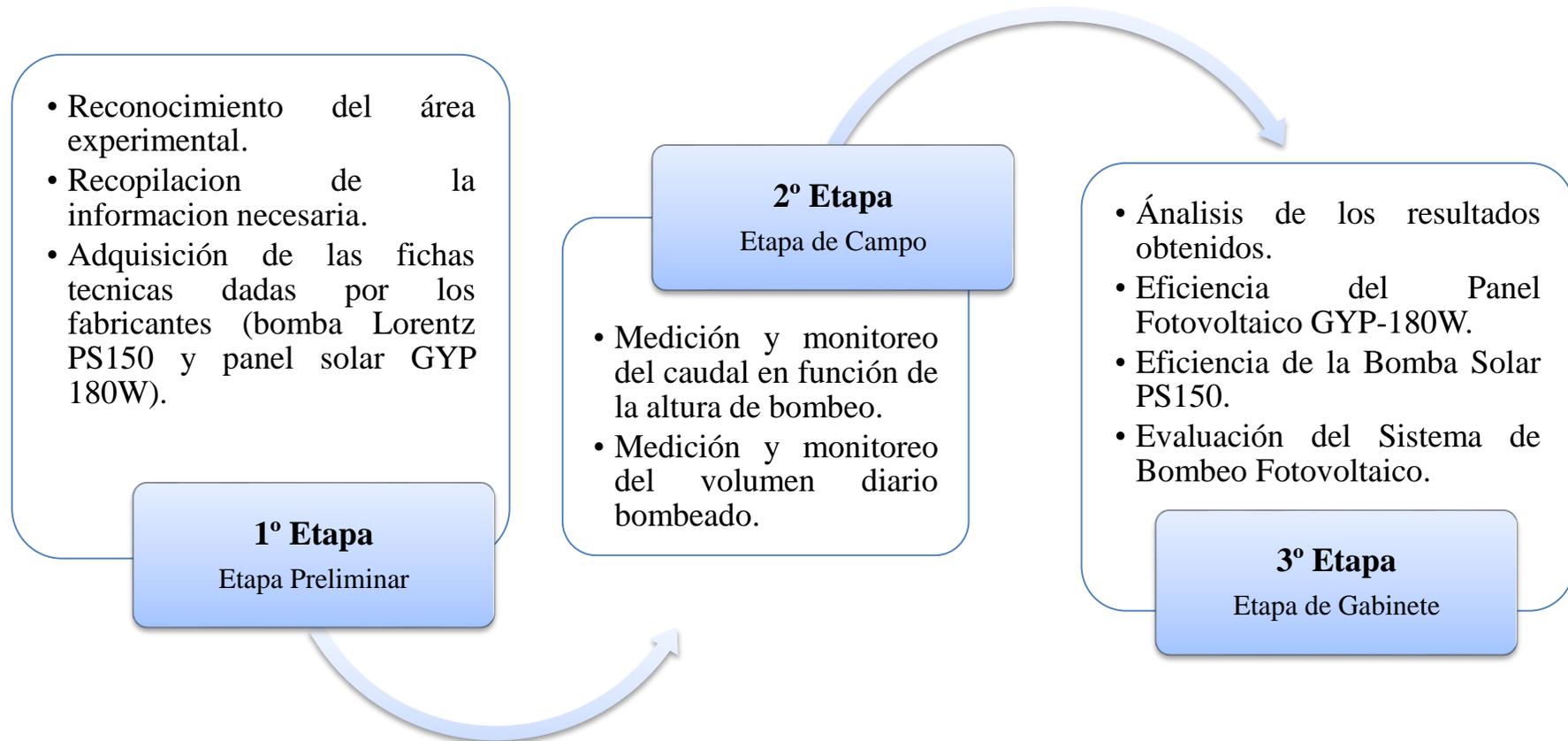


Gráfico 1: Mapa de procesos de la metodología de tesis.

3.2.1. PRIMERA ETAPA: RECONOCIMIENTO DEL ÁREA EXPERIMENTAL Y DE LOS EQUIPOS

Existe un sistema instalado de bombeo fotovoltaico en el distrito de Yaurisque. Antes de empezar con la evaluación se hizo un análisis de la fuente de agua, revisión de las fichas técnicas de los componentes del sistema de bombeo solar brindados por el fabricante (bomba Lorentz PS150 y panel solar GYP 180W), la recopilación de la información de los productos agrícolas sembrados en la zona y su requerimiento hídrico durante su periodo vegetativo; y, por último, se obtuvo la información climática de la estación meteorológica CECADE.

Además, se seleccionaron los equipos de medición necesarios para medir los parámetros relevantes para el análisis del funcionamiento del sistema y se hizo un esquema de la ubicación de los equipos para el bombeo fotovoltaico. (Ver Figura 16)

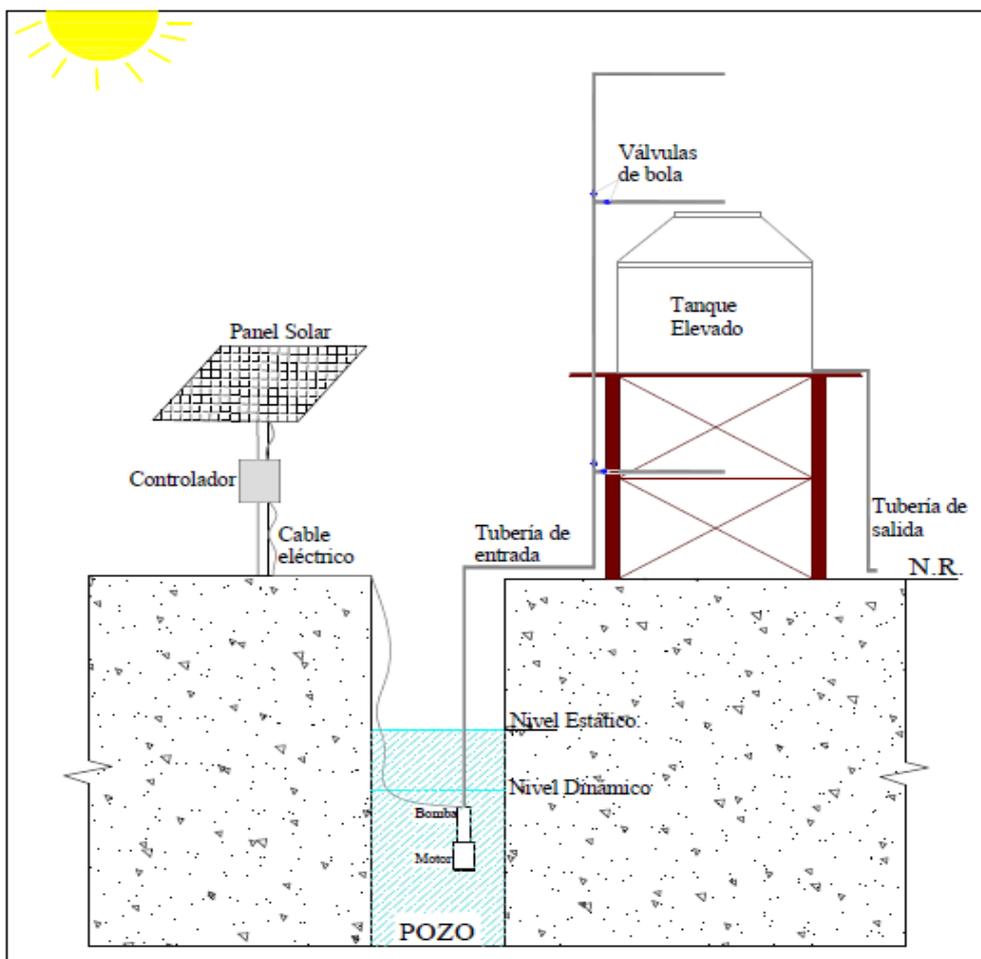


Figura 16: Ubicación de los equipos en el sistema de bombeo fotovoltaico.

El proceso de calibración de los equipos de medición está garantizado por CECADE.

- La radiación (W/m^2): se midió con el Piranómetro.
- El voltaje dado por el panel (V): se midió con un multímetro, que actuó como voltímetro.
- La corriente dada por el panel (A): se midió con un multímetro, que actuó como amperímetro.
- Los factores climatológicos como la velocidad de viento, temperatura ambiental y precipitación fueron medidos con los equipos de la estación meteorológica CECADE.
- El caudal del sistema (m^3/h): se midió el tiempo con un cronómetro y el volumen con un balde calibrado de 5 lt.
- Nivel de agua del pozo (m): se midió con una flexómetro.
- Volumen de agua del tanque elevado (m^3): se midió con una regla.

3.2.2. SEGUNDA ETAPA: MEDICIÓN Y MONITOREO DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

Durante las horas sol, el panel fotovoltaico recibe energía solar, generando electricidad para operar una bomba sumergible con el fin de suministrar agua a un tanque elevado, que se encuentra sobre una estructura de madera de 6 metros de altura. Esta evaluación es importante porque tiene como fin conocer la eficiencia en conjunto e individualmente cada uno de los componentes principales (bomba solar Lorentz PS150 y el panel fotovoltaico GYP-180M) del sistema de bombeo fotovoltaico. A pesar de que los fabricantes entregan la información del comportamiento de los equipos, esto no garantiza que actúen de la misma manera en distintos lugares de operación.

La evaluación del sistema se realizó diariamente, durante 8 días, desde el 30 de agosto hasta el 6 de septiembre del año 2017 (época de estío en Yaurisque). Las mediciones se realizaban desde las 8 am o desde que la energía obtenida por el panel fuera suficiente para el funcionamiento de la bomba (radiación superior a los $650 W/m^2$); y se terminaban hasta que las condiciones de radiación permitiesen el funcionamiento de la bomba (aproximadamente 3 pm); además otro factor que no permitía el funcionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico era la sombra generada por los cerros y las nubes densas

que impedían el paso de los rayos solares. El panel fotovoltaico fue orientado hacia el norte con una inclinación de 17° .

Después de terminar cada día las mediciones en campo se continuaba con el trabajo de gabinete con la ayuda de una computadora, donde se organizaban los datos, se hacían las conversiones y los cálculos correspondientes.



Foto 3: Etapa de medición y monitoreo del sistema de bombeo fotovoltaico.

3.2.2.1. MEDICIÓN Y MONITOREO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE BOMBEO

Los primeros 4 días se registró caudal cada hora en función a las alturas de bombeo ya establecidas (5, 10 y 15 metros), usando el método volumétrico mediante balde - cronometro, y también se midió los siguientes parámetros:

- La radiación.
- El voltaje y la corriente que el panel solar daba a la bomba.
- El tiempo que se demora en llenar un balde de 5 lt.
- Nivel de agua del pozo, al inicio y final de bombeo.

Con estos datos se calculó el caudal obtenido por la bomba alimentada con la energía solar del momento. La variación de la altura de bombeo se hacía controlando manualmente las “Válvulas de bola” ubicadas en la tubería de conducción.

El propósito de esta medición es medir el efecto de la altura en el caudal bajo las mismas condiciones de radiación.



Foto 4: Válvulas de bola para modificar la altura de bombeo.

3.2.2.2. MEDICIÓN Y MONITOREO DEL VOLUMEN DIARIO BOMBEADO.

Los últimos 4 días se registró los datos cada 30 minutos, desde que la bomba empieza a suministrar agua al tanque elevado a un desnivel de 10 metros hasta que deja de funcionar, ya sea por causas de la radiación del momento que no permite que la bomba funcione o la distancia de la bomba al nivel de agua es muy baja, se midió los siguientes parámetros:

- La radiación.
- El voltaje y la corriente que el panel solar daba a la bomba.
- Nivel de agua del pozo, al inicio y final de bombeo.
- El volumen de agua almacenado en el tanque.

El propósito de esta medición es comprobar el tiempo de llenado del tanque elevado en base a la radiación solar diaria.

3.2.3. TERCERA ETAPA: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS MEDIDOS EN CAMPO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.2.3.1. EFICIENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Se realizó una evaluación del rendimiento del panel solar con las mediciones hechas en campo y se comparó con los datos dados por el fabricante. Los parámetros eléctricos fueron obtenidos en función de la curva Intensidad – Voltaje (I-V) del módulo teniendo en cuenta los puntos más importantes:

- Corriente a máxima potencia (I_{mp}): es la corriente que entrega el panel a potencia máxima bajo unas determinadas condiciones de radiación y temperatura.
- Tensión a máxima potencia (V_{mp}): es la tensión que entrega el panel a potencia máxima bajo unas determinadas condiciones de radiación y temperatura.
- Potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$): potencia entregada por la célula solar es máxima, y corresponde al punto de la curva donde el producto de la tensión por la corriente es máximo.

$$P_{m\acute{a}x} = I_{mp} \times V_{mp}.$$

$P_{m\acute{a}x}$	Potencia eléctrica (watts)
I_{mp}	Intensidad de corriente eléctrica (amperios)
V_{mp}	Voltaje (voltios)

Después de graficar la curva I- V, con los datos hallados se obtiene el rendimiento del panel fotovoltaico a partir de la fórmula:

$$\mu = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A}$$

μ Rendimiento del panel solar (%)

A Área del panel solar (m²)

Finalmente se calcula la eficiencia del panel solar, que sirve para medir los niveles máximos de producción en campo, se expresa:

$$Eficiencia (\%) = \frac{Potencia\ obtenida}{Potencia\ teórica} \times 100$$

3.2.3.2. EFICIENCIA DE LA BOMBA SOLAR

A partir de los datos medidos en campo se calculó la capacidad de bombeo y almacenamiento en función a la curva característica de la bomba solar, Altura – Caudal - Potencia (h-Q-P).

- a) Con los datos de la tensión y la corriente transmitida por el panel fotovoltaico, se calculó la potencia neta con la que trabaja la bomba solar a diferentes alturas. Las mediciones respectivas se tabularon de la siguiente manera:

Hora	Radiación (W/m ²)	Tensión (Volts)	Corriente (Amperios)	Potencia P(W)=V*I
------	----------------------------------	--------------------	-------------------------	----------------------

- b) Se calculó el caudal bombeado a diferentes alturas de descargas (5, 10 y 15 metros) con los datos del tiempo que se demoraba en llenar un balde de 5lt. .Las mediciones respectivas se tabularon de la siguiente manera:

Altura de bombeo (m)	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (m ³ /h)	Volumen diario (m ³)
-------------------------	---------------------	----------------------	-------------------------------	-------------------------------------

- a) Se midió el nivel del agua del pozo para determinar los niveles de abatimiento provocado por el bombeo y su capacidad de recuperación. Las mediciones respectivas se tabularon de la siguiente manera:

Hora	Nivel del agua (m)	Abatimiento (m)
------	-----------------------	--------------------

- b) Finalmente, para analizar el comportamiento de la bomba se halló la eficiencia de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\rho \times Q \times g \times H}{P}$$

η	Eficiencia de la bomba
g	Gravedad (9.81 m/s ²)
Q	Caudal (m ³ /s)
ρ	densidad (1000 kg/m ³)
H	altura manométrica (m)
P	Potencia de la bomba (Watts)

3.2.3.3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

Antes de empezar con el análisis de los componentes del sistema en conjunto, se evaluó la influencia de los factores meteorológicos en el comportamiento del sistema de bombeo fotovoltaico.

Otro factor importante del comportamiento de este sistema es conocer la cantidad de volumen de agua a un tanque elevado con una altura fija que se puede suministrar dependiendo de la radiación diaria. Es por ello, que se hizo un análisis de regresión lineal, donde se obtuvo las gráficas y la ecuación de la relación entre las variables dependientes (Volumen de agua) y las variables independientes (Radiación, voltaje e intensidad).

3.2.3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se procesaron los datos tomados en campo con la ayuda de herramientas informáticas (Excel 2013 e InfoStat) para la presentación de los datos en tablas y gráficas. Se analizó las variables dependientes más importantes del sistema de bombeo fotovoltaico para determinar su eficiencia, su relación con otras variables y pronosticar su comportamiento bajo diferentes intensidades de radiación.

El pronóstico del comportamiento del clima se obtuvo a partir de los datos históricos de 3 años de la estación meteorológica CECADE, los cuales se procesaron para obtener los valores promedio diarios y compararlos con los valores medidos de la radiación.

Además con los datos obtenidos se calculó el caudal diario que puede ser suministrado por la bomba, el cual será usado para riego en los cultivos sembrados en el Distrito de Yaurisque, Cusco. Es por ello, que se hizo un análisis relacionando la necesidad de agua de la cedula de cultivo con el caudal obtenido, lo cual determinó el cultivo característico de la zona que se va a regar, y el área cultivada.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EFICIENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO:

Para calcular la eficiencia del panel fotovoltaico se graficaron los valores de corriente y voltaje medidos a una radiación de 800 W/m^2 para las diferentes alturas de bombeo (Gráfica 2) y se comparó con la curva I-V de la ficha técnica (Gráfica 3). Los valores de corriente y voltaje en un punto de trabajo están impuestos por las cargas externas, en este caso se usó las alturas de bombeo a 5,10 y 15 metros dadas por el sistema de bombeo fotovoltaico (Ver cuadro 6).

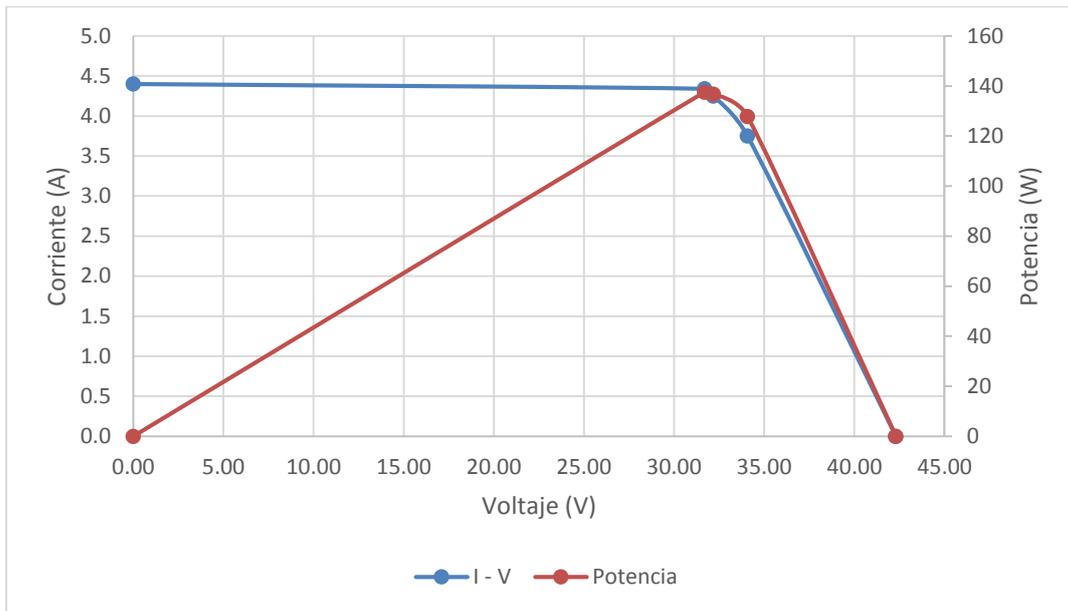
Cuadro 6: Valores de la curva de Intensidad – Voltaje.

Carga (m)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
0	0.00	42.30	0
5	3.75	34.07	127.76
10	4.25	32.17	136.72
15	4.34*	31.70**	137.58
0	4.40	0.00	0.00

(*) Corriente a máxima potencia (I_{mp})

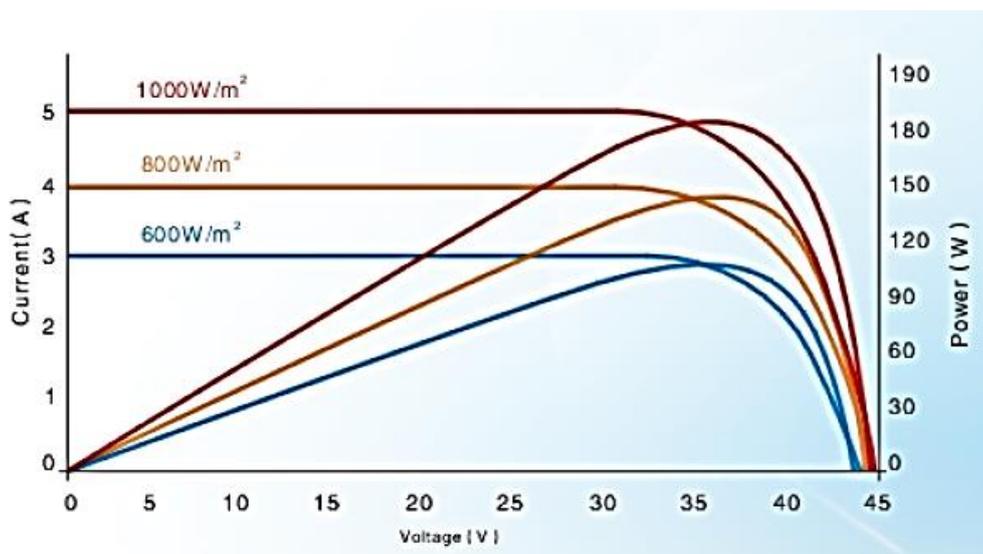
(**) Tensión a máxima potencia (V_{mp})

Gráfico 2: Curva de Intensidad – Voltaje para una Radiación de 800 W/m² (En campo).



Las condiciones óptimas de la potencia del panel solar según la ficha técnica son medidos y controlados en el laboratorio; temperatura= 25°C, radiación= 1000 W/m², pasado esta temperatura las pérdidas de potencia se ve afectado en -0.44% de cada grado del aumento de la temperatura en la celda fotovoltaica, sin embargo las características del panel bajo condiciones de trabajo real tienen comportamiento similar que las curvas I-V de la ficha técnica.

Gráfico 3: Curva de Intensidad – Voltaje (Ficha técnica, módulo GYP 180W).



La curva I-V muestra las variaciones de Intensidad (I) y Tensión (V) que presento el panel fotovoltaico sometido a diferentes cargas (diferentes alturas de bombeo) con una radiación de 800 W/m^2 . Este gráfico es importante porque permite observar el comportamiento del panel en campo y compararlo con las gráficas dada por el fabricante. La potencia máxima pico desarrollada por el panel fue 137.58 W (valores de corriente y voltaje máximo de $I_{mp}= 4.34$ y $V_{mp}= 31.7$). Sabiendo que el área de colección total del panel es 1.28 m^2 , la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad del panel solar a 800 W/m^2 resulto 13.47% . Este valor es parecido a la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad dada por la ficha técnica, 13.71% . La eficiencia de las condiciones reales de campo con respecto a las condiciones óptimas de la ficha técnica resulto de 95.54% , lo que quiere decir que el panel está en muy buenas condiciones de operatividad.

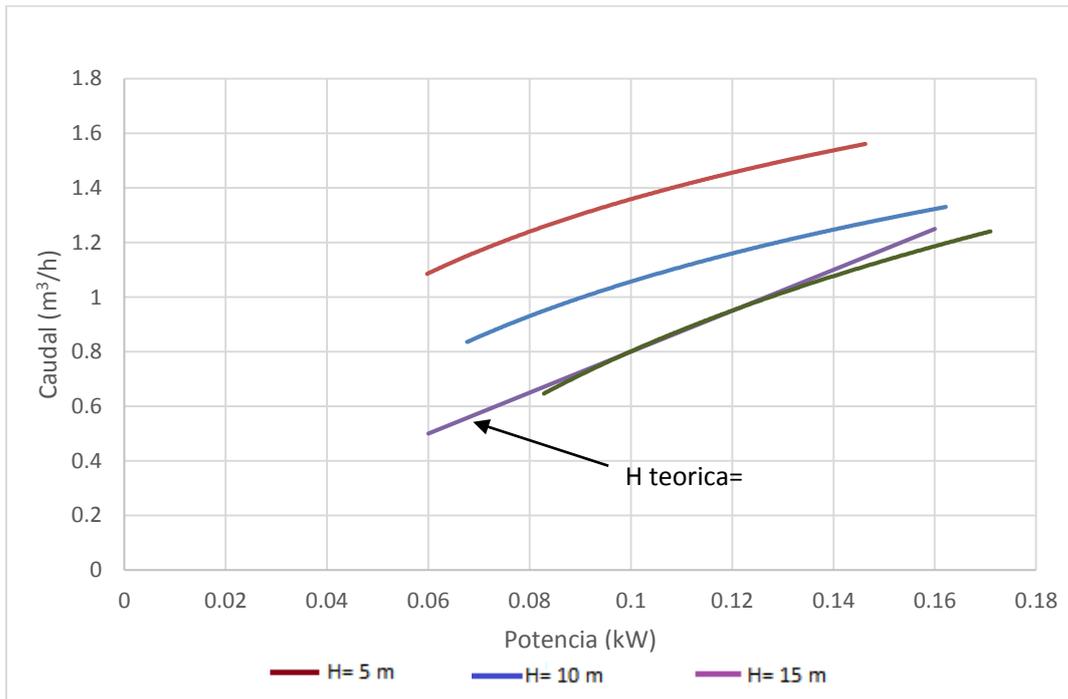
4.2. EFICIENCIA DE LA BOMBA SOLAR

En las fichas técnicas de las bombas solares sumergibles Lorentz, compuesto por una bomba y un motor, encontramos las curvas características que definen su comportamiento a diferentes alturas de bombeo, las cuales sirven como referencia para determinar las curvas dadas por los datos medidos en campo, según los valores de caudal y potencia.

En esta investigación, las alturas de bombeo utilizadas para testear el comportamiento del sistema fueron 5, 10 y 15 metros, de las cuales se ha comparado la de 10 metros ya que se puede encontrar y comparar con la ficha técnica. Por otro lado, se generó nuevas curvas de comportamiento a 5 y 15 metros.

En la gráfica 4, se puede observar que la curva Potencia – Caudal a 10 metros sigue la misma tendencia que los cálculos teóricos, sin embargo, existe una pequeña variación en su comportamiento; este resultado puede deberse a las pérdidas de carga que se producen por fricciones en las tuberías, codos, válvulas u otros al paso del agua desde la bomba hasta el final de su descarga.

Gráfico 4: Curva de Potencia – Caudal (Lorentz PS 150).



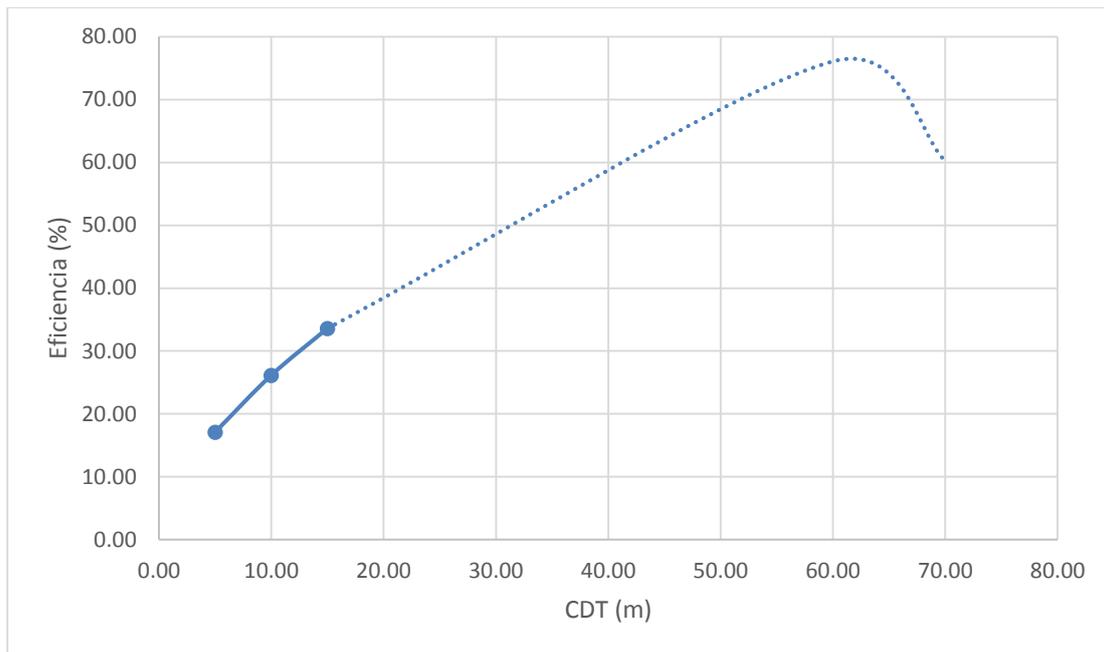
Cuando se planteó la instalación del sistema de bombeo fotovoltaico a estudiar, se asumió que la pérdida de carga es el 5% de la altura vertical total, debido a que el tanque de almacenamiento se encuentra cerca del pozo (a menos de 10 metros) y se usa el tamaño de tuberías recomendado.

La eficiencia de las bombas solares es creciente a medida que la **Carga Dinámica Total (CDT)** aumenta y el caudal disminuye. Cuando la CDT sobrepasa un valor máximo, su eficiencia empieza a disminuir. En el cuadro 7 se muestran las eficiencias según la carga dinámica total de la bomba Lorentz PS150, para las diferentes alturas de bombeo medidas en campo (5, 10 y 15 metros), como se puede comprobar los resultados se ajustan a la curva de eficiencia de la bomba ubicados en el tramo inicial donde la eficiencia vs. CDT genera una curva casi recta (Ver gráfico 5).

Cuadro 7: Valores de la eficiencia de campo medidos según la carga dinámica total.

CDT(m)	Eficiencia (%)
5.00	17.08
10.00	26.12
15.00	33.58

Gráfico 5: Eficiencia de la Bomba sumergible Lorentz PS150 según la carga dinámica total.



El equipo de bombeo marca Lorentz PS150 donado a CECADE; está diseñado para impulsar agua hasta alturas de 60 m como se muestra en los gráficos de la ficha técnica (Ver anexo 2), sin embargo, la infraestructura existente donde se encuentra el tanque elevado y las tuberías de impulsión habilitadas por CECADE tienen alturas máximas de descarga de hasta 15 m. Se usó estas instalaciones para realizar la medición de datos del presente estudio, condición que no ha permitido comprobar la capacidad máxima a mayores alturas de bombeo. (Ver foto 5)

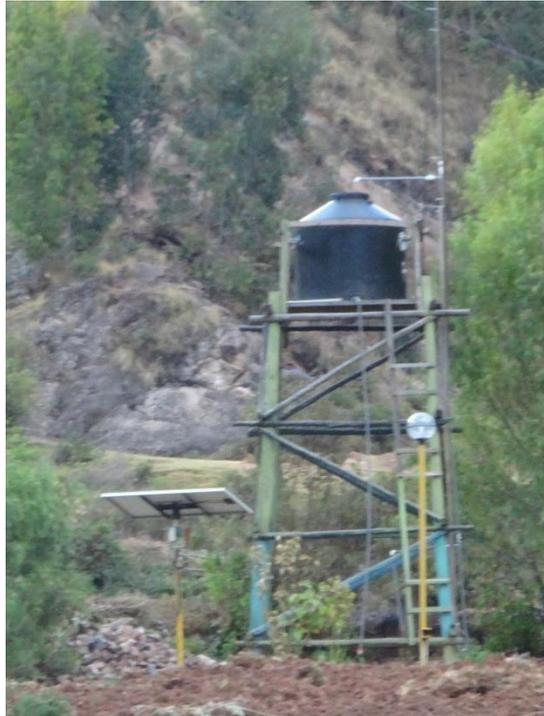
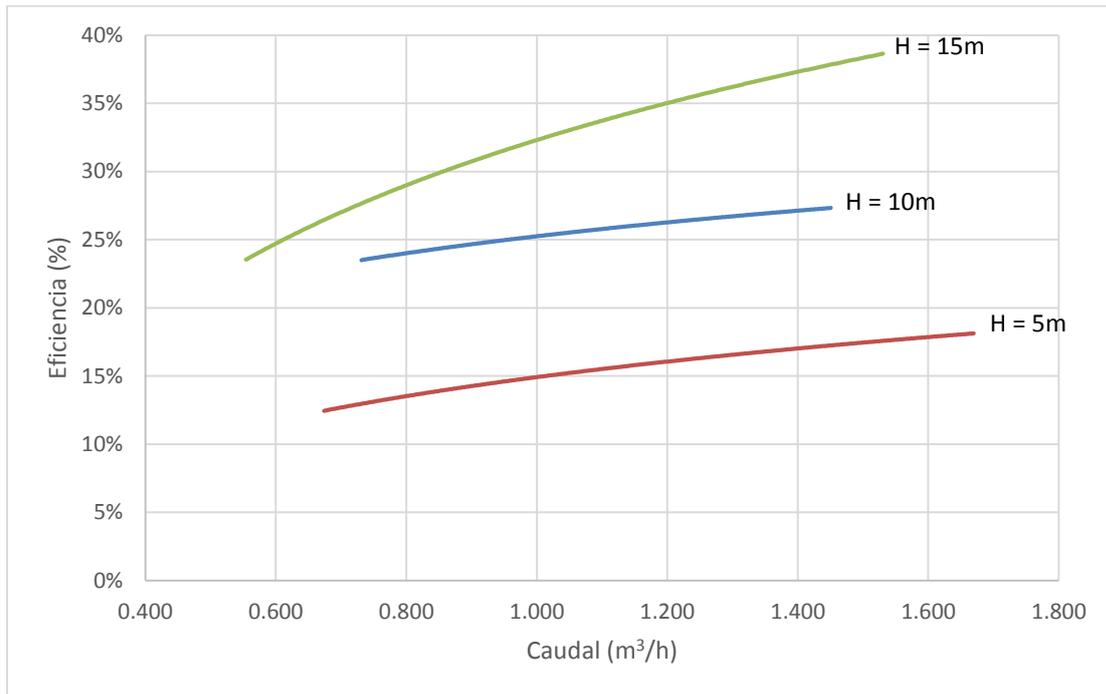


Foto 5: Vista del sistema de bombeo FV (panel solar, tanque elevado).

La eficiencia de un equipo de bombeo está determinada por el fabricante que relaciona la altura, el caudal y la potencia. Todas las curvas de eficiencia tienen inicialmente una línea ascendente positiva que termina en un quiebre; punto donde se obtiene la máxima eficiencia para un caudal determinado. La presente tesis ha determinado que la eficiencia del equipo de bombeo a 10 m de altura tiene un valor de 26.12%; eficiencia que está ubicado en el tramo inicial de la curva ascendente de la bomba Lorentz PS150. El comportamiento de la eficiencia de la bomba con respecto al caudal está dado en el Gráfico 6, donde se comprueba que los valores obtenidos en campo del caudal suministrado al tanque elevado ubicado a 10 m, varían desde un caudal mínimo de 0.73 m³/h a una radiación promedio de 500 W/m², y un caudal máximo de 1.45 m³/h. a una radiación promedio de 1000 W/m².

Gráfico 6: Eficiencia de la Bomba sumergible Lorentz PS150 según el caudal.



Los niveles de producción de la bomba pueden ser afectados por el comportamiento hidráulico de la fuente de agua (Gráfico 7), en este caso un pozo, por eso es necesario saber sus características hidráulicas para inferir su comportamiento cuando es sometido a un bombeo, sin embargo el presente caso es único, porque las condiciones de la fuente de agua está dado por un río cercano (menos de 3 metros de distancia).

El agua se infiltra al pozo constantemente recuperando el nivel de agua diariamente ($H_{ST}=3.175$ m) como se visualiza en el gráfico 8. Por otro lado, cuando hay mayor radiación, el volumen de agua succionado es mayor, lo que ocasiona que la bomba se pare automáticamente por un bajo nivel dinámico ($H_{DT}=2.66$ m); para que la bomba vuelva a trabajar se debe esperar, para que el pozo se recupere al nivel de agua que permita reanudar el bombeo. Las variaciones en el nivel de abatimiento son explicadas por la variación en la intensidad de la radiación solar.

Gráfico 7: Condiciones de abatimiento a diferentes caudales.

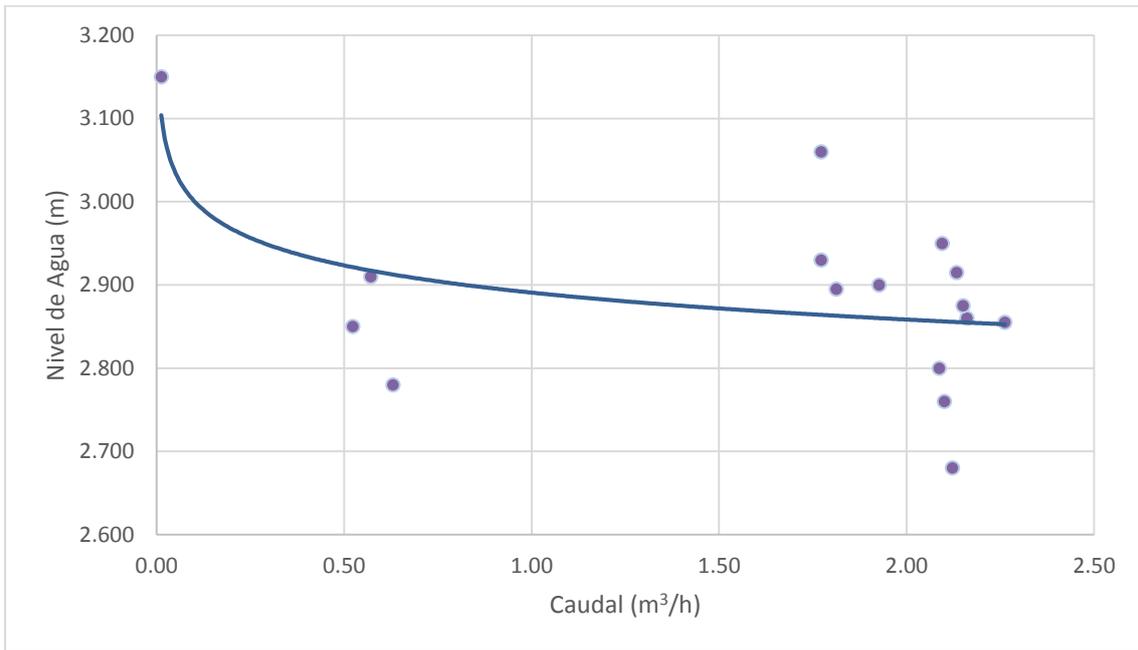
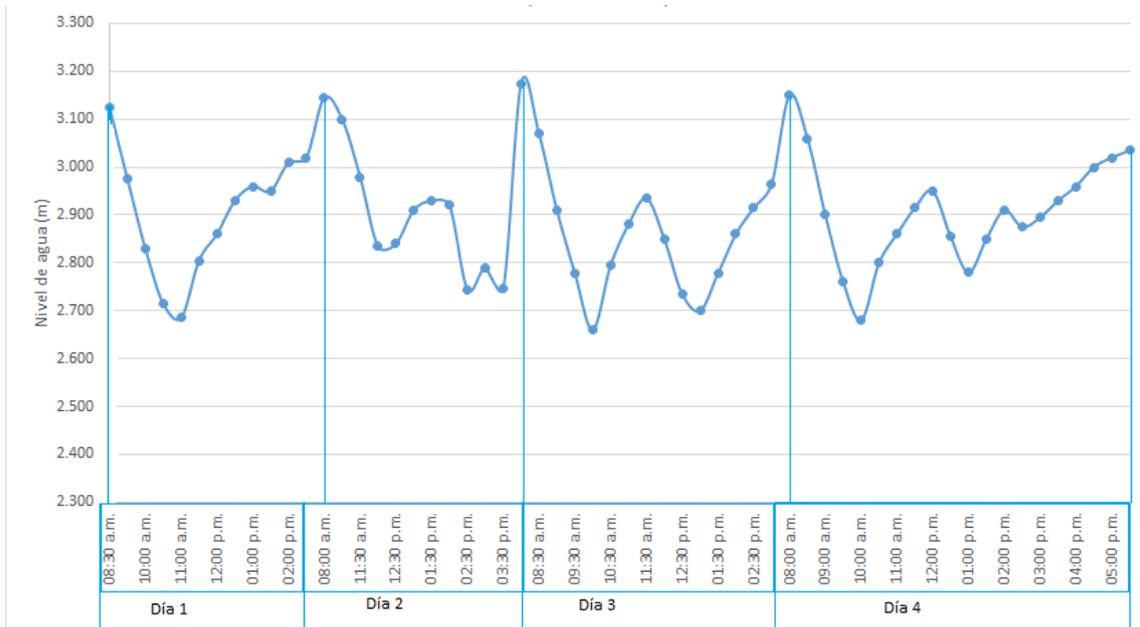


Gráfico 8: Variaciones diarias del nivel de agua del pozo.



4.3. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

La eficiencia del sistema de bombeo fotovoltaico determinada por el producto de la eficiencia del panel solar y la bomba sumergible es de 24.95%. Este valor obtenido se debe a que la bomba no alcanza su máxima eficiencia por estar sometida a condiciones limitadas de caudal y altura con respecto a su capacidad óptima, por lo que el sistema en su conjunto tiene una baja eficiencia.

Por otra parte, se evaluó la influencia de los factores que pueden afectar el comportamiento de sistema de bombeo fotovoltaico.

4.3.1. INFLUENCIA DE LOS FACTORES METEOROLÓGICOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO SOLAR

La generación de energía de un sistema de bombeo fotovoltaico puede ser afectada por los factores meteorológicos del lugar donde se encuentra (Radiación solar, Temperatura, Velocidad de viento), por ello es recomendable hacer un análisis de regresión lineal del efecto de las condiciones climatológicas en la potencia, además de hacer un diagnóstico de cual factor influye más sobre el sistema.

Según los valores en el cuadro 8, se obtiene la ecuación de la Potencia neta en función a la radiación solar, debido a que la Velocidad del viento y la Temperatura no influyen en el comportamiento del sistema de bombeo solar:

$$Potencia\ neta\ (W) = 52.65 + 0.08 \times Radiacion\ (W/m^2)$$

Se aplicó los métodos estadísticos de regresión lineal múltiple, y se obtuvo como resultado que la radiación solar es el único factor que muestra una alta influencia en la generación de la potencia por el módulo fotovoltaico, CpMallows= 54.95 y p-valor menor a 0.05. En cambio, la temperatura y la velocidad del viento no son significativas en la generación de energía fotovoltaica (p-valor > 0.05).

Cuadro 8: Análisis estadístico de la relación de los factores climáticos con la generación de la energía fotovoltaica.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Potencia Neta (W)	58	0.53	0.50	352.44	501.72	512.02

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	52.65	11.70	29.18	76.11	4.50	<0.0001		
Radiación (W/m ²)	0.08	0.01	0.06	0.11	7.27	<0.0001	54.95	1.07
Temperatura (°C)	0.40	0.67	-0.94	1.73	0.60	0.5541	3.37	1.76
Velocidad de viento (m/s)	0.14	6.87	-13.63	13.92	0.02	0.9834	3.02	1.66

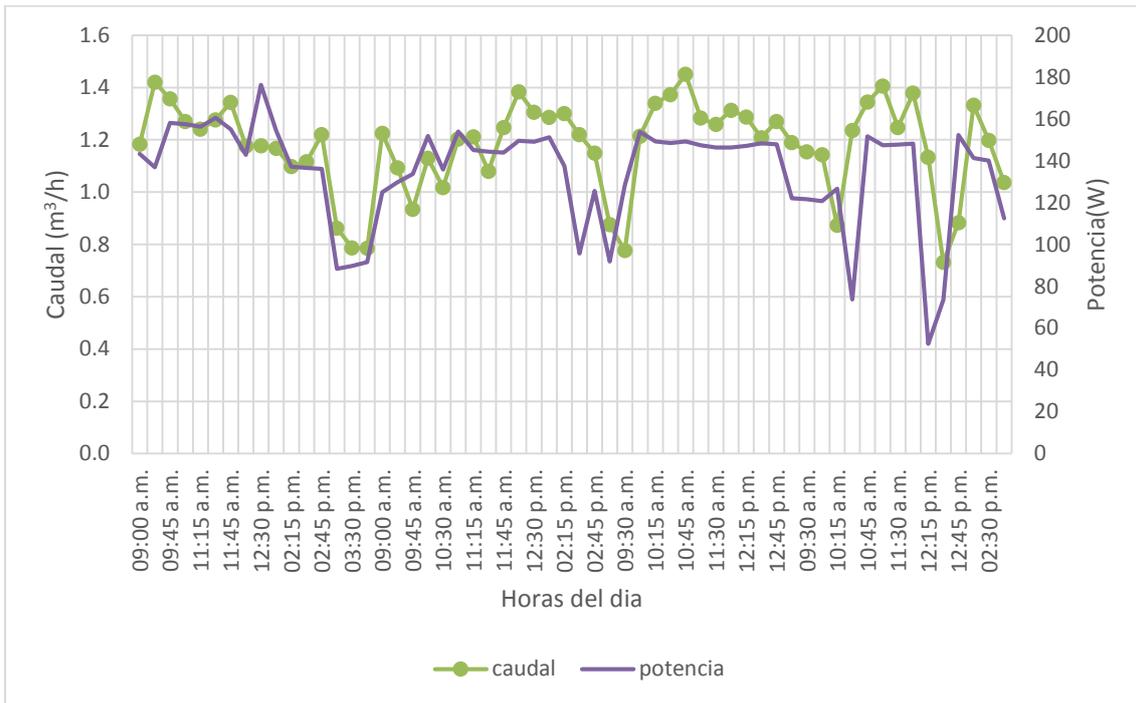
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	18243.94	3	6081.31	20.11	<0.0001
Radiación (W/m ²)	15991.31	1	15991.31	52.89	<0.0001
Temperatura (°C)	107.18	1	107.18	0.35	0.5541
Velocidad de viento (m/s)	0.13	1	0.13	4.4E-04	0.9834
Error	16326.50	54	302.34		
Total	34570.44	57			

4.3.2. RELACIÓN ENTRE CAUDAL Y POTENCIA.

En el gráfico 9, se determina que el caudal tiene relación directa con la potencia generada por el sistema de bombeo fotovoltaico, como se puede observar los valores de potencia varían desde 52.42 W a 176.28 W para caudales desde 0.731 m³/h a 1.45 m³/h. La variación de la potencia está determinada por la radiación solar en el momento de la medición.

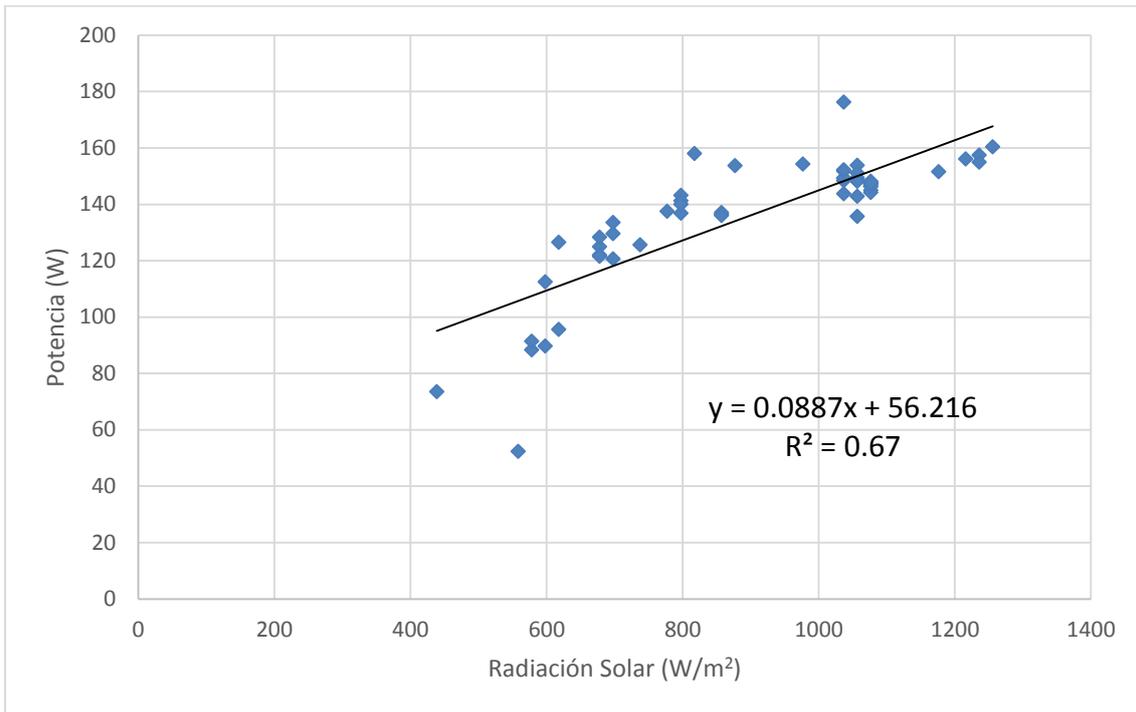
Gráfico 9: Relación entre caudal y potencia.



4.3.3. RADIACIÓN SOLAR / PANEL FOTOVOLTAICO

Como se observa en el gráfico 10, la cantidad de radiación incidente influye significativamente de manera positiva en la potencia generada por el panel solar, es decir a mayor radiación solar, mayor es la potencia. Estos dos parámetros tienen una correlación alta ($R^2= 0.67$), que implica que cualquier variación de la radiación solar en el rango de 438.5W/m^2 a 1255.7 W/m^2 influye en el cambio de los valores de potencia, sin embargo, pueden existir más de una variable que influyen en la potencia generada por el panel.

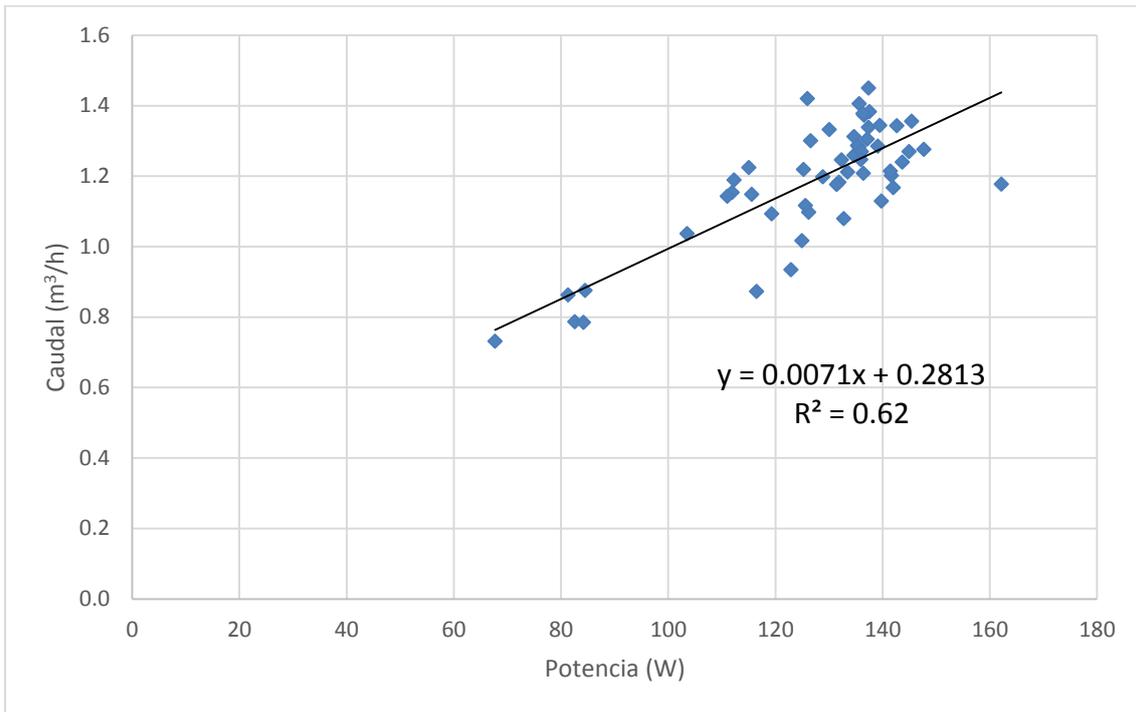
Gráfico 10: Potencia = f (Radiación solar).



4.3.4. PANEL FOTOVOLTAICO / BOMBA

Como se observa en el gráfico 11, la potencia suministrada al motor influye significativamente en el caudal generado por la bomba, según el método estadístico de regresión lineal ($R^2 = 0.62$), existe una correlación entre estos dos parámetros, es decir la potencia es un factor determinante para predecir el caudal que suministrara la bomba y por ende el volumen diario de agua que se puede almacenar.

Gráfico 11: Caudal = f (Potencia).



4.3.5. SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.

4.3.5.1. CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR INSTANTÁNEA

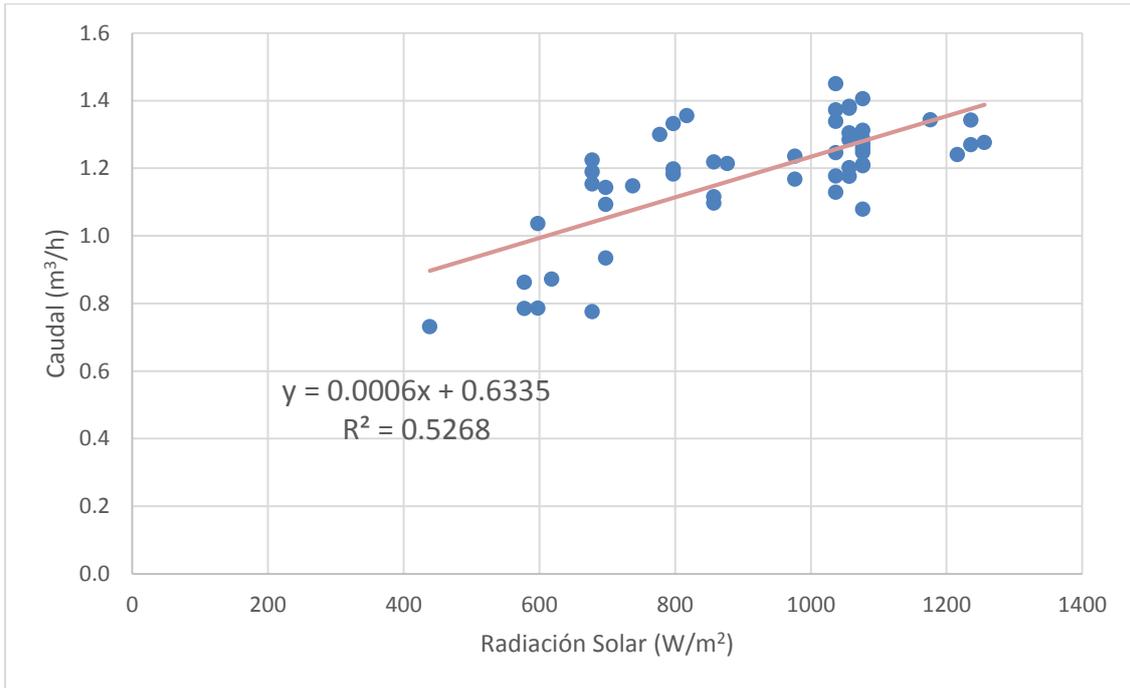
La finalidad de esta investigación es conocer el caudal que suministra la bomba, para así saber el volumen de agua que se puede disponer diariamente, por este motivo se hizo la correlación de las variable más importantes del sistema de bombeo fotovoltaico, con la finalidad de encontrar una relación de la variable dependiente (Caudal) con la variable independiente (Radiación Solar) que determine la cantidad de agua suministrada por el sistema de bombeo fotovoltaico con la finalidad de usarlo para riego.

En el gráfico 12, se puede observar los resultados de esta correlación por el método de regresión lineal. Se obtiene que la radiación solar instantánea y el caudal tienen un coeficiente de correlación de $R^2=0.53$, es decir existe una relación directa positiva buena entre estas dos variables. A mayor intensidad de radiación solar, mayor potencia suministrada a la bomba, por ende, mayor caudal.

La relación de las variables estará determinada por la siguiente ecuación, la cual solo funciona con un rango de valores de la radiación solar (438.51 W/m² - 1255.73 W/m²).

$$Caudal(m^3/h) = 0.0006 \times Radiación \left(\frac{W}{m^2}\right) + 0.6335$$

Gráfico 12: Caudal = f (Radiación solar).



4.3.5.2. VOLUMEN DE AGUA DIARIO CON BOMBEO CONTINUO

En el cuadro 9, se muestra la radiación solar promedio medida durante el tiempo que se demoró en llenar una cantidad de volumen de agua en el tanque elevado desde que la bomba empezaba a funcionar hasta que se detenía.

Durante los días de medición, se logró almacenar un volumen de 4 m³ durante el día aproximadamente. Volumen que estuvo limitado por el abatimiento del pozo que suspendía el bombeo y se tenía que esperar a que el nivel del agua se recuperara. También en el periodo de recojo de la información se tenía presencia de nubes que ocasionaban que la radiación solar disminuyera, bajando la potencia suministrada a la bomba, que

afecta directamente al caudal de bombeo y como consecuencia al volumen de agua suministrado por día.

Cuadro 9: Valores del volumen, radiación solar y tiempo de llenado.

Días	Radiación solar promedio (W/m ²)	Volumen Total (m ³)	Tiempo de llenado (Horas)
1	737.493	2.047	1.7
2	1036.476	2.160	1
	555.611	2.123	2
3	761.411	2.472	1.75
	617.899	1.723	1.5
4	749.452	2.419	1.85
	1195.934	1.066	0.5
	896.950	0.500	0.1

En el cuadro 10 se observa que existe un coeficiente de correlacion alto ($R^2= 0.9$) del efecto de la radiacion solar y el tiempo de llenado del tanque elevado en el volumen almacenado.

Cuadro 10: Análisis estadísticos de la relación del volumen de agua con el tiempo de llenado y la Radiación Solar durante los días de medición.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Volumen Total(m3)	8	0.90	0.86	0.27	5.48	5.80

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-1.15	0.81	-3.25	0.94	-1.42	0.2158		
Radiación (W/m2)	1.6E-03	7.0E-04	-1.9E-04	3.4E-03	2.30	0.0698	6.58	2.31
Tiempo (horas)	1.26	0.22	0.71	1.82	5.84	0.0021	30.55	2.31

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	3.02	2	1.51	22.10	0.0033
Radiación (W/m2)	0.36	1	0.36	5.29	0.0698
Tiempo (horas)	2.33	1	2.33	34.05	0.0021
Error	0.34	5	0.07		
Total	3.36	7			

Estos valores se obtuvieron usando los métodos estadísticos de regresión lineal múltiple para analizar la variable dependiente (Volumen de agua) en función a las variables independientes (Radiación solar promedio, Tiempo de llenado). El resultado de este análisis, determina que la radiación solar promedio y el tiempo de funcionamiento de la bomba están altamente relacionados con el volumen almacenado durante el día y que no existe correlación entre estas variables, debido al que el valor de inflación de la varianza (VIF) es menor a 5.

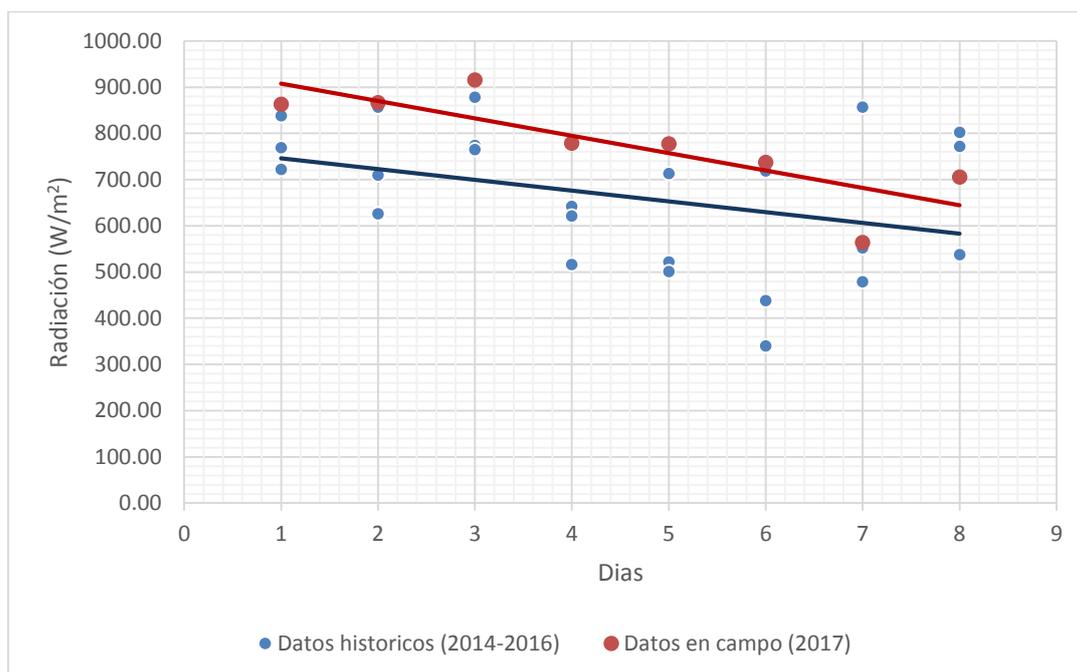
4.4. EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR OBTENIDA EN CAMPO

Al comparar la radiación solar (gráfico 13), entre los datos históricos y los medidos en campo, se demuestra que el comportamiento de la radiación solar en los días medidos es mayor, pero la tendencia es similar al del comportamiento de los datos históricos de radiación solar durante 3 años, con la pendiente negativa, es decir los datos medidos durante la práctica están dentro de la tendencia del comportamiento de la radiación a través de los años. (Ver cuadro 11)

Cuadro 11: Datos de la radiación solar promedio en los días de medición.

Mes	Día	Nº	Promedio Radiación Solar (W/m ²)
ago-17	30	1	862.88
	31	2	866.87
sep-17	1	3	915.55
	2	4	778.73
	3	5	777.23
	4	6	737.49
	5	7	564.33
	6	8	705.38

Gráfico 13: Comparación de la radiación histórica (2014-2016) y la radiación de los días medidos (2017).

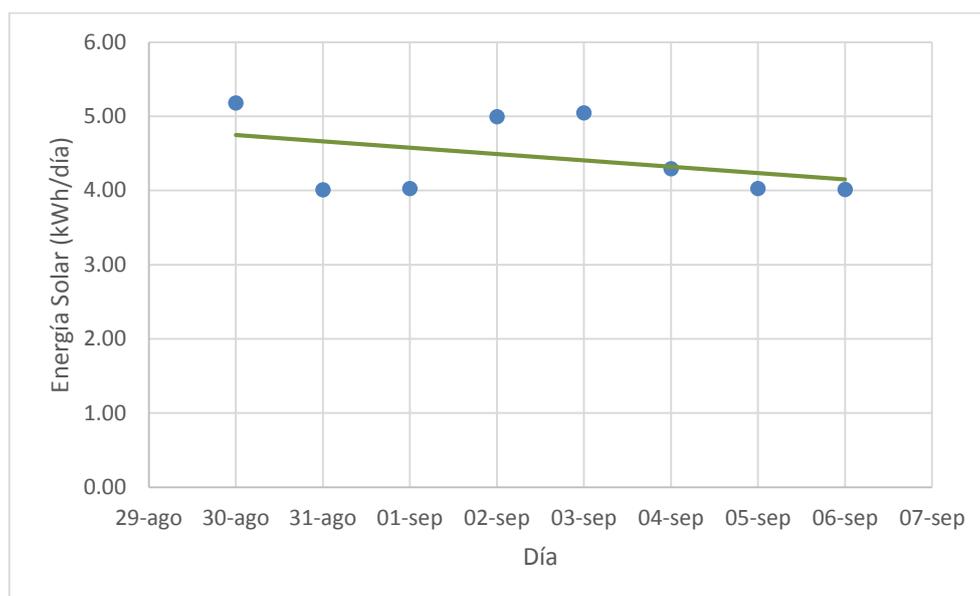


En el cuadro 12, se muestra los datos de la energía solar durante las horas solar pico, las cuales varían desde 4 a 5 horas por día obteniendo una radiación promedio alrededor de 1000 W/m^2 . Como se observa en la gráfica 14, la energía solar durante los días de medición tiende a disminuir, esto se debe a que el presente estudio se realizó en los últimos meses de la época seca, donde la hora solar pico y la radiación incidente disminuye.

Cuadro 12: Datos de la Energía Solar en las horas solar pico.

Día	Horas de Sol Pico	Radiación Promedio (W/m^2)	Energía Solar (kWh/m^2)
30-ago	5	1036.476	5.18
31-ago	4	1002.048	4.01
01-sep	4	1006.578	4.03
02-sep	5	999.103	5.00
03-sep	5	1009.900	5.05
04-sep	4	1073.493	4.29
05-sep	4	1006.578	4.03
06-sep	4	1004.086	4.02

Gráfico 14: Valores de la Energía Solar durante el periodo de medición.



4.5. NECESIDAD DE AGUA DE LA CÉDULA DE CULTIVO

Durante los días de medición, se calculó el volumen promedio diario de agua que el sistema de bombeo FV puede suministrar, obteniendo un valor de 4.17 m³. En el cuadro 13, se muestran los valores obtenidos.

Cuadro 13: Volumen diario suministrado por el sistema de bombeo FV.

Día	Volumen (m ³)
1	4.620
2	4.742
3	4.883
4	4.610
5	2.047
6	4.283
7	4.194
8	3.985
Volumen Promedio Diario	4.171

Con la oferta de agua promedio diaria obtenida, se analizó los diferentes cultivos característicos de la zona de Yaurisque, para hallar el área máxima que se puede regar con un sistema de riego por goteo a baja presión, el cual tiene la mayor eficiencia (85%)

cuando se usa con sistemas de bombeo FV. En el cuadro 14, se muestran los diferentes cultivos y el área máxima que el sistema puede regar según la necesidad de agua de cada cultivo.

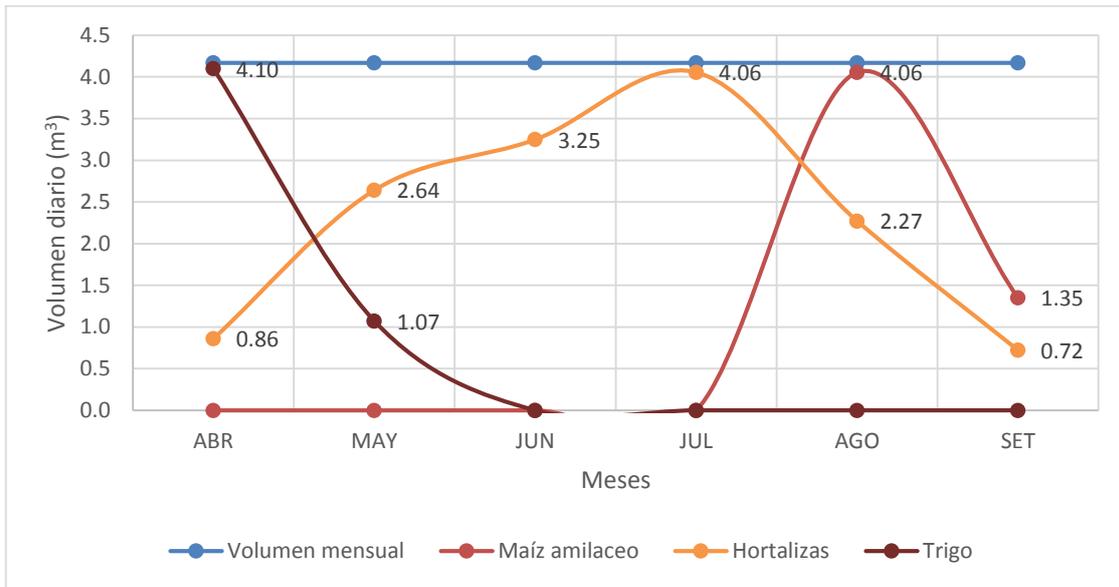
Cuadro 14: Área máxima de riego según la necesidad de agua de los cultivos.

Cultivo	Área (Ha)	Área (m ²)
Maíz amiláceo	0.11	1100
Quinoa	0.095	950
Oca	0.11	1100
Haba Verde	0.09	900
Hortalizas	0.095	950
Cebada Grano	0.12	1200
Trigo	0.135	1350

Debido a que las necesidades de agua de los cultivos varían durante los meses, existe la posibilidad de usar el agua sobrante del sistema de bombeo FV en otros cultivos, es por ello que se desarrolló 5 alternativas de los posibles cultivos combinados para ser regados simultáneamente según sus necesidades hídricas, calculando la máxima área que se puede regar durante el año, donde el sistema de bombeo fotovoltaico se emplearía en cubrir el déficit de agua que se generaría en época de estiaje.

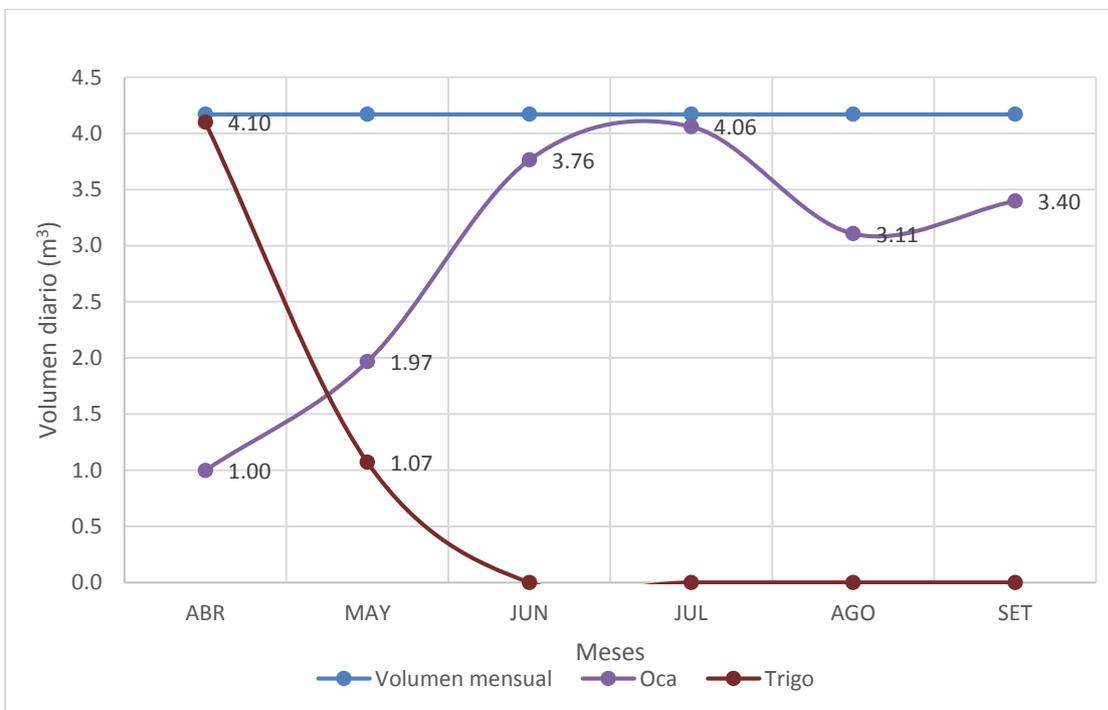
En el grafico 15, se analizó la alternativa 1 dada por la demanda de agua de los cultivos: maíz amiláceo, hortalizas y Trigo, obteniendo un área total de riego de 3400 m² durante todo el año.

Gráfico 15: Alternativa 1 según la oferta y demanda del volumen del agua.



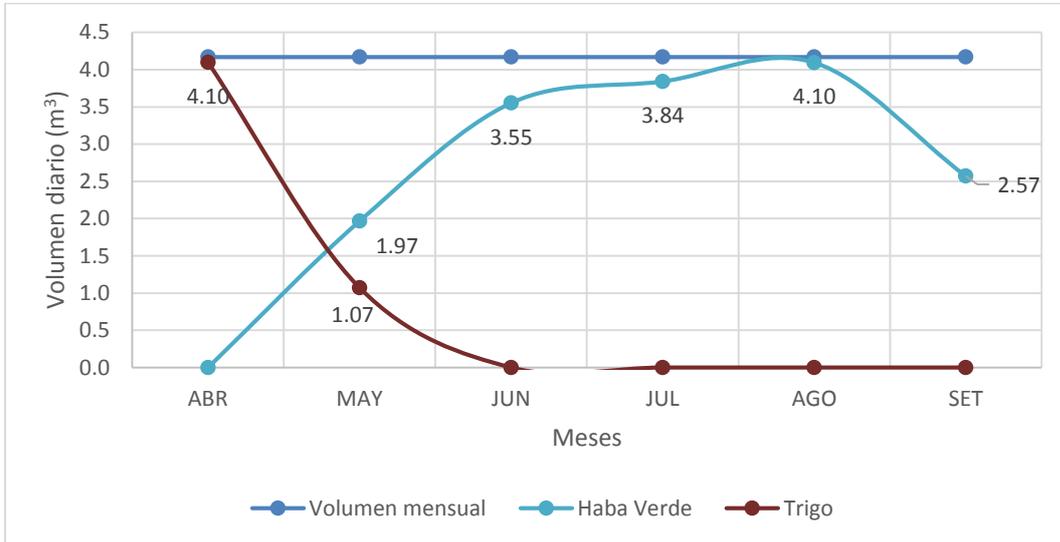
En el gráfico 16, se analizó la alternativa 2 dada por la demanda de agua de los cultivos: Oca y Trigo, obteniendo un área total de riego de 2450 m² durante todo el año.

Gráfico 16: Alternativa 2 según la oferta y demanda del volumen del agua



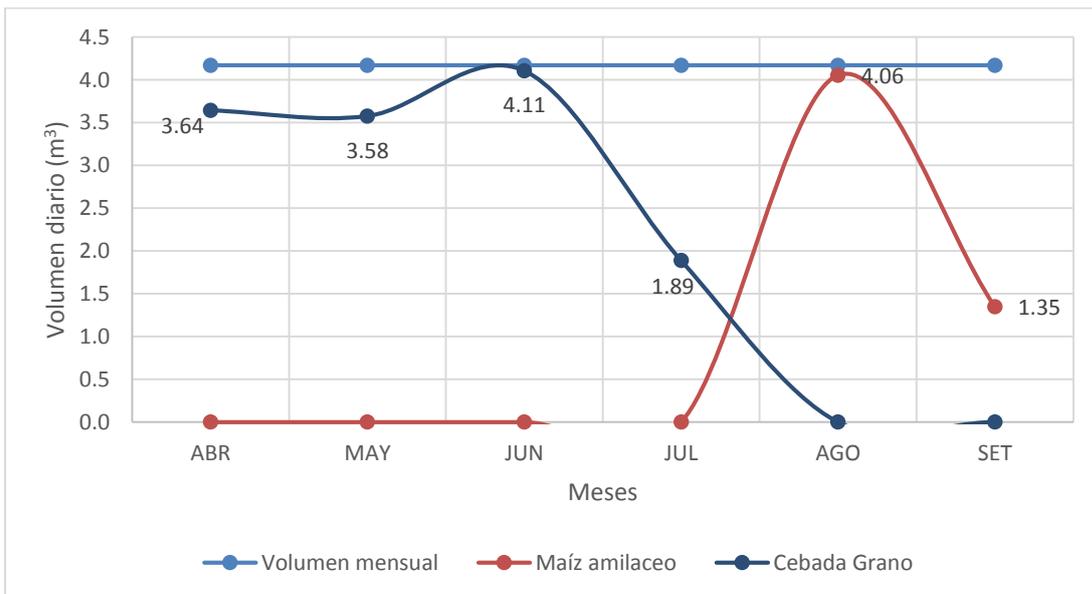
En el gráfico 17, se analizó la alternativa 3 dada por la demanda de agua por los cultivos: Haba verde y Trigo, obteniendo un área total de riego de 2250 m² durante todo el año.

Gráfico 17: Alternativa 3 según la oferta y demanda del volumen del agua



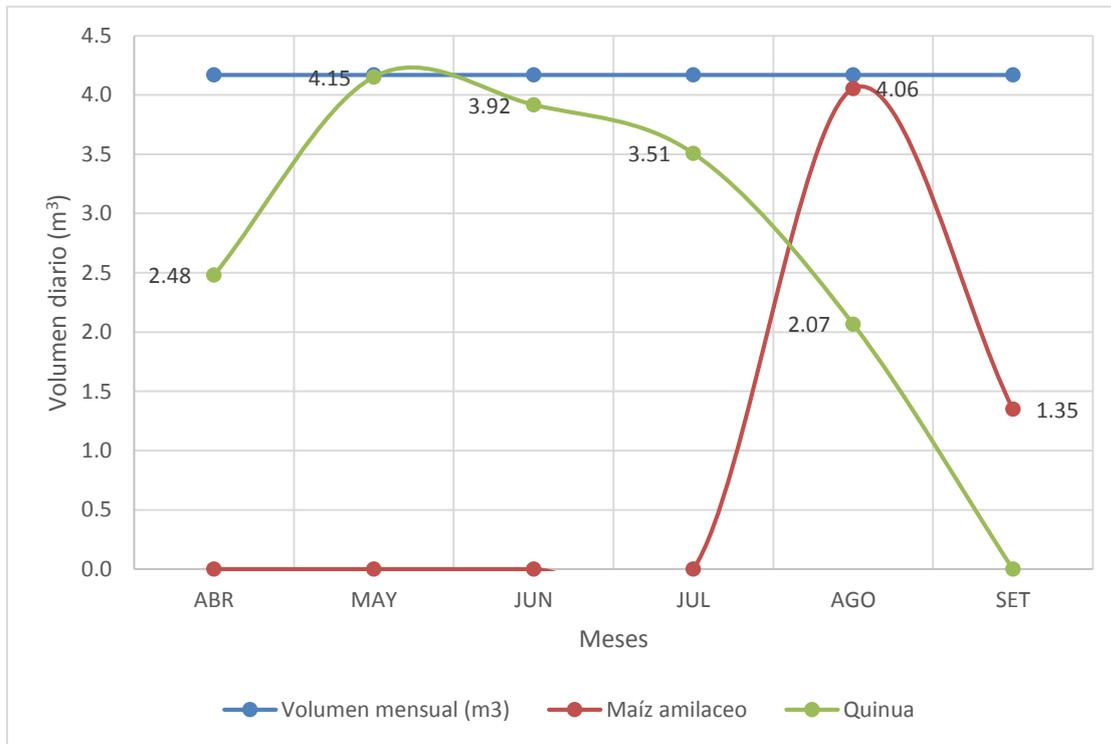
En el gráfico 18, se analizó la alternativa 4 dada por la demanda de agua por los cultivos: Maíz amiláceo y Cebada Grano, obteniendo un área total de riego de 2300 m² durante todo el año.

Gráfico 18: Alternativa 4 según la oferta y demanda del volumen del agua



En el gráfico 19, se analizó la alternativa 5 dada por la demanda de agua por los cultivos: Maíz amiláceo y Quinoa, obteniendo un área total de riego de 2050 m² durante todo el año.

Gráfico 19: Alternativa 5 según la oferta y demanda del volumen del agua



V. CONCLUSIONES

- De la especificación técnica del motor-bomba Lorentz PS150, que indica una máxima eficiencia a 60 m. Para el caso del estudio (sistema CECADE) se usó una CDT de 10 m, lo que ocasiono que el diseño sea ineficiente (26.12%) por estar sobredimensionado, debido a que está funcionando a una altura mucho menor que la óptima.
- El diseño del sistema de bombeo FV evaluado con una eficiencia de 24.95%, sirve para suministrar agua a 7 cultivos seleccionados. La mejor alternativa es el riego continuo en el maíz, trigo y hortalizas bajo riego por goteo a parcelas agrícolas de 3,400 m², bajo las condiciones climáticas de la zona durante los meses de Abril a Setiembre, que es la época de estiaje y de mayor radiación durante el todo día.
- De los datos de radiación tomados comparados con los históricos se deduce que en promedio la radiación evaluada estuvo 17% más alta en comparación los años históricos del 2014 al 2016. Lo que podría indicar un deterioro de la capa de ozono, entre otros. También se pudo observar en la estación meteorológica del CECADE un índice UV alto (mayor a 10).
- De las CDT evaluadas, entre 5,10 y 15m, se concluye que la CDT de 15m logra el mejor resultado de eficiencia del motor-bomba con un promedio de 33.58%, que varía entre 24.33% a 44.91%. Esta oscilación en la eficiencia se debe a la variable externa radiación solar que, durante el día, muestra un cambio de los caudales de 0.55 a 1.53 m³/h.

- La intensidad de la radiación solar media durante el periodo de evaluación fue de 910.35 W/m^2 , con un promedio de horas de sol de 5 horas/día. Durante los 8 días de medición, el volumen promedio de bombeo diario fue de 4.17 m^3 .
- La radiación solar en horas de sol pico, durante el periodo de medición en campo varía desde 1002.048 hasta 1036.476 W/m^2 , obteniéndose una energía solar que oscila desde 4.01 hasta $5.18 \text{ kWh/m}^2\text{-dia}$.
- El panel solar Guangyi GYP-180M y la bomba sumergible Lorentz PS150 conservaron los patrones de comportamiento dados por sus fabricantes.
- Para las condiciones de Yaurisque durante el periodo de evaluación, y con los equipos mencionados, se obtuvieron las siguientes ecuaciones que explican el comportamiento del caudal en función a la radiación: **$Q = 0.0006 * R + 0.6335$** ; con un coeficiente de correlación de 52.68%, donde Q es el caudal (m^3/h), R la radiación solar (W/m^2). También se obtuvo otra ecuación donde explica la variación de la potencia en función a la radiación: **$P = 0.089 * R + 56.216$** , con coeficiente de correlación de 67%, donde P es la potencia (W). Esto indica que el sistema es muy dependiente de la radiación solar, tanto para el caudal obtenido como la potencia generada.

VI. RECOMENDACIONES

- Sobre el sistema de bombeo solar se debe evaluar: la profundidad, la velocidad de recarga y el caudal de trabajo del pozo; luego, se debe elegir adecuadamente los componentes del sistema de bombeo fotovoltaico (motor-bomba y panel solar); también, se debe calcular los diámetros óptimos de las tuberías de impulsión y el grosor de los cables de alimentación panel-bomba. Adicionalmente es recomendable evaluar la implementación y uso de baterías solares; estas permitirían el riego nocturno incrementando el volumen de agua diario disponible para el riego.
- Es importante buscar un lugar con una mayor incidencia de radiación solar durante el día, o sea, no una quebrada honda, sino una zona abierta para obtener radiación solar desde el amanecer hasta el atardecer, ya que en la zona de estudio solo se obtuvo radiación solar desde las 9 am hasta las 3 pm por los cerros colindantes. Si se desea mejorar la captación de radiación solar podría usarse un sistema de rastreo solar que aumenta de un 30% a un 50% la energía captada.
- Para diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico se debe consultar las curvas características de la bomba antes de su selección, para así obtener un sistema de bombeo eficiente a partir de los datos de caudal y altura dinámica, debido a que cada fabricante tiene una gama de equipos capaces de bombear diferentes caudales a presiones distintas. Para que este sistema de bombeo fotovoltaico tenga una óptima eficiencia considerando las condiciones del pozo, se necesita una bomba de 170 W y un panel solar de 180 W.

- La implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico en una zona con alta radiación solar y buenas condiciones climáticas, favorecen el funcionamiento eficiente de los componentes del sistema como se presenta en la localidad de Yaurisque.
- Realizar un estudio geológico e hidrogeológico para evaluar el estado de los recursos hídricos del lugar donde se instalará el sistema de bombeo solar, para obtener la información suficiente de la cantidad de agua disponible (rendimiento del pozo) y las posibilidades futuras de explotación, debido a que el comportamiento del pozo afecta significativamente el caudal de bombeo de la motor-bomba sumergible.
- El área del cultivo a regar debe estar a una distancia menor de 10m del sistema de bombeo FV para evitar pérdidas de carga, se deberá realizar los cálculos correspondientes, y considerar el material de conducción, la distancia y pendiente del área de cultivo.
- Para poder abarcar un área mayor de riego, es recomendable regar varios cultivos durante el periodo de estío, que es cuando existe más horas de sol al día; de esta forma se hará más eficiente los módulos de riego.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarón Sánchez Juárez et al. 2017. 2017. Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial. México. Universidad Nacional Autónoma de México. 309 p.
- Absalón Vásquez V., Issaak Vásquez R., Cristian Vásquez, Miguel Cañamero K. 2017. Fundamentos de la ingeniería de riego. Lima, Perú. Universidad Agraria La Molina. 435 p.
- Bureau Veritas Formación, Javier Méndez Muñoz, Rafael Cuervo García. 2009. Energía Solar Fotovoltaica. Madrid, España. Fundación Confemetal. 305 p.
- CECADE (Centro de capacitación para el desarrollo, Perú). 2012. Sistema de bombeo de agua.
- CECADE (Centro de capacitación para el desarrollo, Perú). 2012. Energía Solar Fotovoltaica.
- David Cruz Baldán. 2011. Estudio del ahorro mediante bombeo solar. Tesis Mag. Sc. España. Universidad Internacional de Andalucía. 76 p.
- Fernando Gil-Albert Velarde. 2015. Manejo, riego y abonado del suelo: UF0012. España. Ediciones Paraninfo. 211 p.
- FIRCO, UNAM, STWDI, Sandia National Laboratories. 2000. Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica. México. Programa de Energía Renovable en México. Volúmenes 1 y 2.

- Fuentes Yague, Garcia Legaspi. 1999. Técnicas de Riego. Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. México. 473 p.

- Gilberto Enríquez Harper. 2005. El ABC de las instalaciones eléctricas residenciales. Editorial Limusa S.A. México. 239 p.

- José Roldan Vilorio. 2012. Energías Renovables: Lo que hay que saber. España. Editorial Paraninfo S.A. 220 p.

- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agraria, PE). 1999. Riego Tecnificado. La Revista Agraria. no.5:8-9

- Linsley Kohler Paulhus. 1977. Hidrología para ingenieros. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill Latinoamericana S.A. 357 p,

- Mancomunidad de municipalidades Rurales “Hermanos Ayar”. 2007. El agua en la mancomunidad de Municipalidades rurales de los hermanos Ayar – Provincia de Paruro.

- Marianella García Villas. 1999. Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo. IEPALA editorial. Madrid, España. 203 p.

- Martínez Hernández, D. 2006. Control digital para convertidor multinivel alimentado con energía solar. Tesis Maestría. Ciencias con Especialidad en Ingeniería Electrónica. Departamento de Computación, Electrónica, Física e Innovación, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Universidad de las Américas Puebla

- Michel Maupoux. 2010. Bombeo de agua mediante energía solar fotovoltaica.

- Pablo Alcalde San Miguel. 2014. Electrotecnia. Madrid, España. Editorial Paraninfo S.A. p. C8. 105 - C8. 106.

- Patricio Méndez L., Juan Inostroza F. 2011. Métodos de Riego. Temuco, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. p.C4. 61.

- Región Cusco. 2013. Proyecto fortalecimiento del desarrollo de capacidades en ordenamiento territorial de la región Cusco, caracterización socioeconómica de la provincia de Paruro, Cusco.

- Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Roma, Italia. Organización de las naciones unidad para la agricultura y la alimentación. 277 p.

- Vicente Mascarós Mateo. 2016. Gestión del montaje de instalaciones solares fotovoltaicas. Madrid, España. Editorial Paraninfo. p. C2. 28.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Ficha Técnica del Panel Solar Guanyi GYP-180W

ANEXO 2: Ficha Técnica de la Bomba Solar Lorentz PS150

ANEXO 3: Valores Promedios Diarios Mensuales De Temperatura Máximas, Medias, Mínimas, Precipitación, Velocidad Y Dirección De Viento, Humedad Relativa Y Energía Solar (promedio 7 años, 2007 – 2014)

ANEXO 4: Álbum fotográfico de la evaluación experimental

ANEXO 5: Datos registrados durante el periodo de evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico

ANEXO 6: Cuadros de cálculos de la necesidad de agua de los cultivos característicos de Yaurisque.

ANEXO 7: Potencial energético de radiación solar en el Perú. Pedro Zanabria Pacheco, X Simposio Peruano de Energía Solar. Noviembre 2003

ANEXO 8: Metodología del diseño para el sistema de bombeo fotovoltaico estudiado

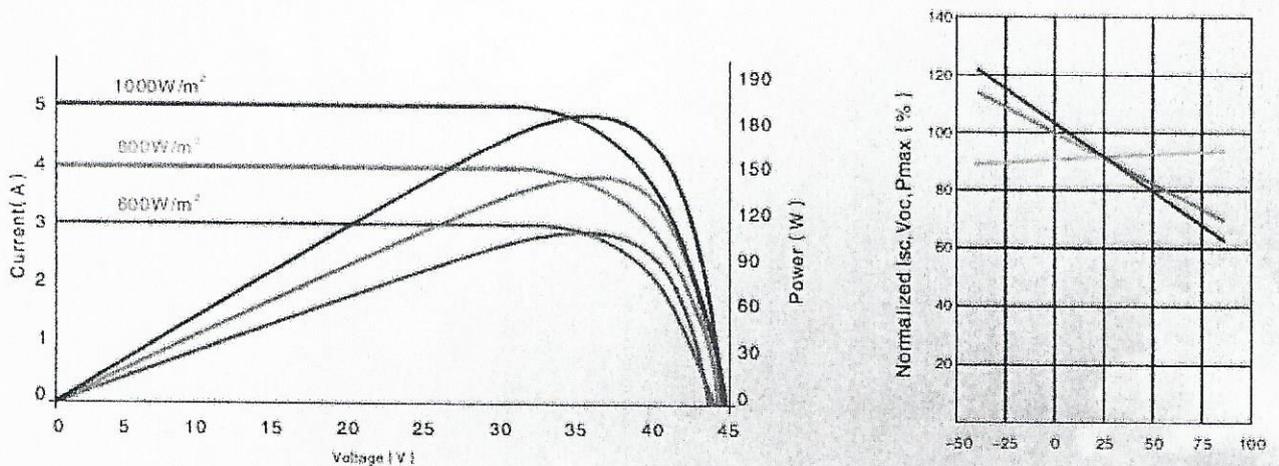
ANEXO 1: Ficha Técnica del Panel Solar Guanyi GYP-180W.

M72-170WP TO 200WP

Electrical Characteristics

MODEL	GYP-170M	GYP-175M	GYP-180M	GYP-185M	GYP-190M	GYP-195M	GYP-200M
Maximum Power at STC* Pmax (Wp)	170	175	180	185	190	195	200
Maximum Power Voltage Vmp (V)	35.2	35.3	36	36.27	36.5	36.7	36.9
Maximum Power Current Imp (A)	4.83	4.96	5	5.1	5.2	5.3	5.42
Open - Circuit Voltage Voc (V)	43.8	44.2	44.8	45	45.2	45.4	45.6
Short - Circuit Current Isc (A)	5.14	5.2	5.3	5.5	5.6	5.7	5.89
Cell Efficiency (%)	15.9	16.4	16.8	16.6	17	17.5	18.1
Module Efficiency (%)	13.3	13.7	14.1	14.49	14.88	15.27	15.67
Tolerance	±3%						
Solar Cell	125*125 mm Mono 72 (6 x 12)						
Max System Voltage (V)	1000V						
Operating Module Temperature	-40°C ~ +85°C						
Nominal Operating Cell Temperature	47 ± 2°C						
Temperature Coefficient of Pmax	-0.44 %/°C						
Temperature Coefficient of Voc	-0.33 %/°C						
Temperature Coefficient of Isc	0.05 %/°C						

I-V Curves



*STC(Standard Test Conditions) 1000W/m², 25°C cell temperature, solar spectrum AM = 1.5
 Specifications and designs included in this datasheet are subject to change without notice
 The company is not responsible for potential typing errors



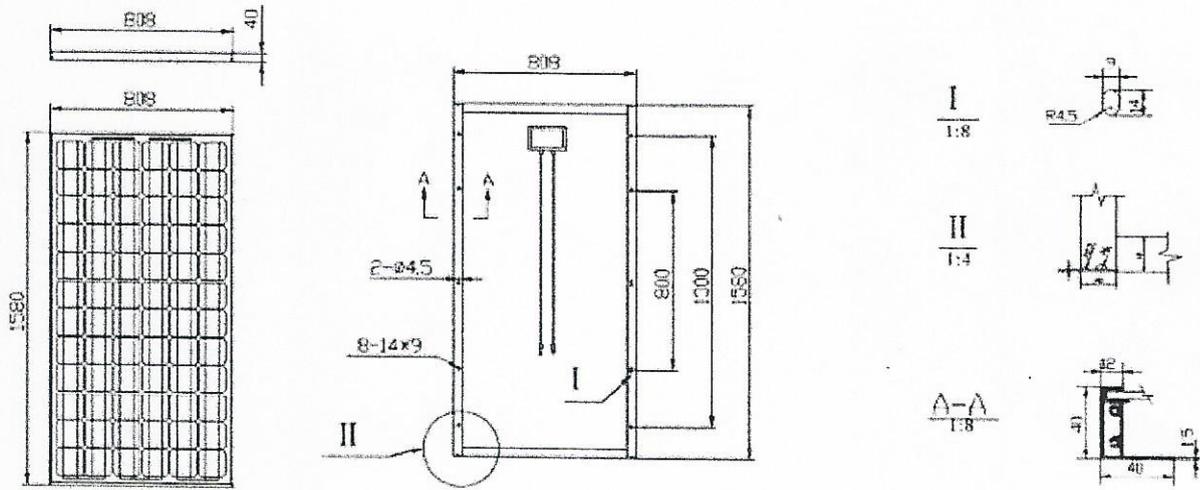
阳光能
ANGYI SOLAR

阳光能源 · 有益生活

SOLAR ENERGY BENEFICIAL FOR LIFE

M72-170WP TO 200WP

Mechanical Specifications



FACE VIEW

BACK VIEW

Unit:mm

Mechanical Characteristics

Dimension (mm)	1580 × 808 × 40
Weight (Kg)	15.5
Cable Type, Diameter and Length	4mm ² , TUV certified, 900mm
Type of Connector	Compatible Type IV and Type III
Junction box	IP65
Glass, Type and Thickness	Ultra-white, Low Iron, Tempered Glass 3.2mm
Bypass-Diodes	3
Mechanical Load	5400 Pa

Warranty

5 years product warranty

10 years performance warranty at 90% power output, 25 years performance warranty at 80% power output.

Packaging Configuration

Packing Configuration	Quantity/Pallet	Loading
23 pcs/Carton Box	46 pcs/Pallet	644 pcs/40ft



www.gytech-solar.com

ANEXO 2: Ficha Técnica de la Bomba Solar Lorentz PS150.

PS150 HR-07S

Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

Gama de sistemas

Altura	max. 60 m
Flujo	max. 1,4 m ³ /h

Datos técnicos

Controlador PS150

- Entradas de control para protección contra operación en seco, control remoto, etc.
- Protegido contra polaridad reversa, sobre carga y temperatura excesiva
- MPPT (Maximum Power Point Tracking) integrado
- Funcionamiento con batería: protección integrada contra descarga total

Potencia	max. 0,30 kW
Voltaje de entrada	max. 50 V
Óptimo Vmp*	> 17 V
Corriente motor	max. 18 A
Eficiencia	max. 98 %
Temp. del ambiente	-30...50 °C
Modo de protección	IP54

Motor ECDRIVE 150-HR-S

- Motor CD sin escobillas - libre de mantenimiento
- Llenada de agua
- Materiales Premium, acero inoxidable: AISI 304/316
- Sin elementos electrónicos en el motor

Potencia nominal	0,30 kW
Eficiencia	max. 92 %
Revoluciones motor	600...3.300 rpm
Clase de aislamiento	F
Modo de protección	IP68
Inmersión	max. 250 m

Cabeza de bomba PE HR-07S**

- Materiales Premium, acero inoxidable: AISI 304/316

Undidad de bomba PU HR-07S (Motor, Cabeza de bomba)

Diámetro de perforación	min. 4,0 in
Temperatura del agua	max. 50 °C

Normas



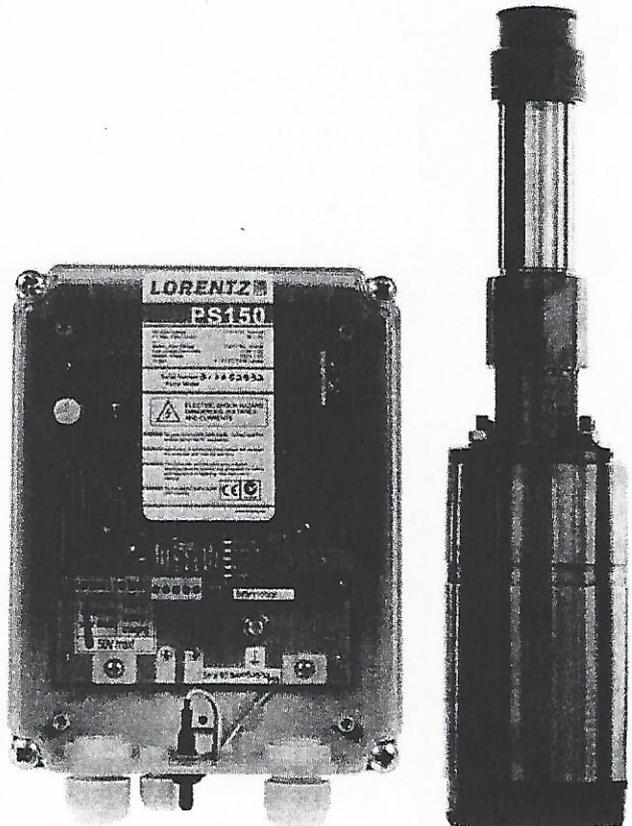
2006/42/EC, 2004/108/EC, 2006/95/EC

IEC/EN 61702:1995,
IEC/EN 62253 Ed.1

El logo refleja la aprobación que ha sido garantizada para este producto familiar. Los productos son ordenados con la aprobaciones específicas que el mercado requiera.

*Vmp: Voltaje máximo de carga bajo STC

**Especificar rango de temperatura por orden



BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG
Kroegerskoppel 7, 24558 Henstedt-Ulzburg, Germany,
Tel +49 (0)4193 7548-0, Fax -29, www.lorentz.de



Creado por LORENTZ COMPASS 3.0.10.51

Todas las especificaciones e información están dadas con buenas intenciones. Los errores son posibles y los productos pueden estar sujetos a cambios sin ninguna notificación. Las fotografías pueden diferenciar de los productos actuales dependiendo de los requerimientos y regularizaciones del mercado local.

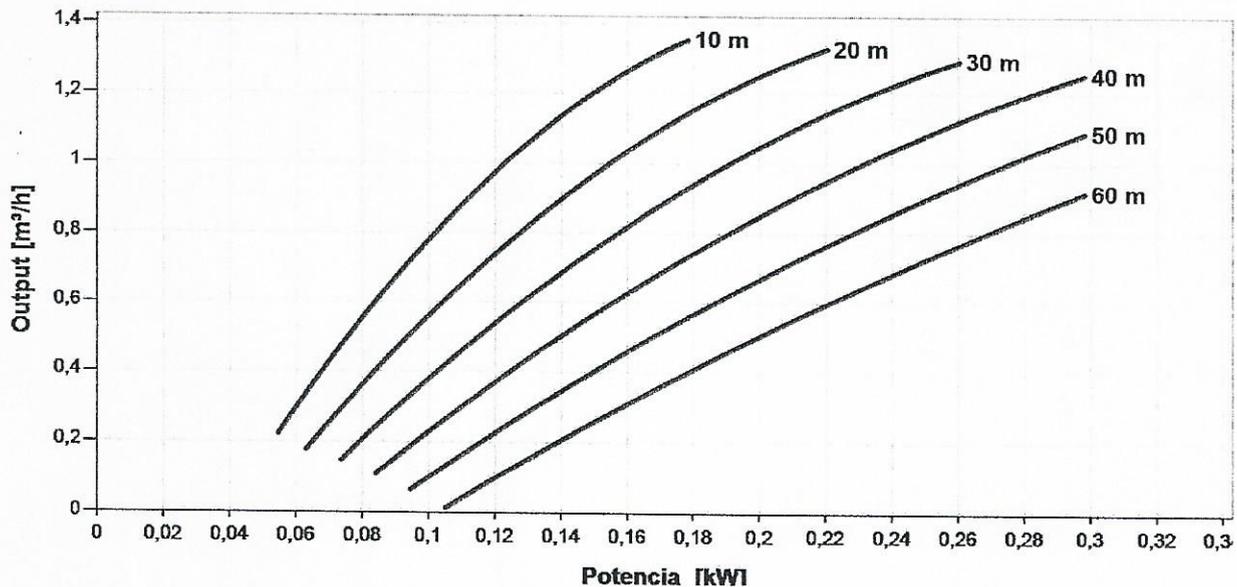
Sun. Water. Life.

PS150 HR-07S

Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

Plantilla de datos de la bomba

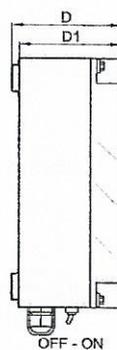
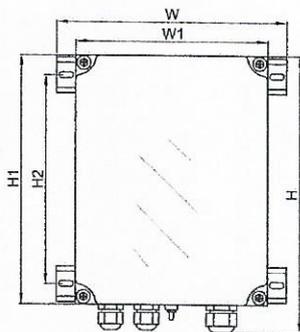
Vmp* > 17 V



Dimensiones y pesos

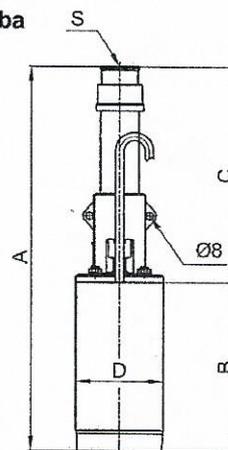
Controlador

H = 276 mm
 H1 = 248 mm
 H2 = 208 mm
 W = 225 mm
 W1 = 188 mm
 D = 108 mm
 D1 = 100 mm



Undidad de bomba

A = 426 mm
 B = 185 mm
 C = 241 mm
 D = 96 mm
 S = 1,25 in



	Peso neto
Controlador	1,2 kg
Undidad de bomba	10 kg
Motor	7,0 kg
Cabeza de bomba	3,0 kg

*Vmp: Voltaje máximo de carga bajo STC

BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG
 Kroegerskoppel 7, 24558 Henstedt-Ulzburg, Germany,
 Tel +49 (0)4193 7548-0, Fax -29, www.lorentz.de



Creado por LORENTZ COMPASS 3.0.10.51

Todas las especificaciones e información están dadas con buenas intenciones. Los errores son posibles y los productos pueden estar sujetos a cambios sin ninguna notificación. Las fotografías pueden diferenciarce de los productos actuales dependiendo de los requerimientos y regularizaciones del mercado local.

Sun. Water. Life.

ANEXO 3: Valores Promedios Diarios Mensuales De Temperatura Máximas, Medias, Mínimas, Precipitación, Velocidad Y Dirección De Viento, Humedad Relativa Y Energía Solar (promedio 7 años, 2007 – 2014).

MES	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tm (°C)	Precipitación (mm)	Viento		HR (%)	Energía solar kWh/m ² .dia
					Velocidad (m/s)	Dirección		
Enero	18	7.8	12.1	162	0.6	SW	68	4.9
Febrero	18	7.4	11.7	133.3	0.6	SW	69	5.2
Marzo	18.3	7.4	11.8	74.1	0.6	SW	70	5.2
Abril	18.9	6.3	11.7	36.6	0.7	SW	68	5.2
Mayo	19.7	4	10.7	7.9	0.7	SW	61	5
Junio	18.5	3	9.8	2.7	0.7	SW	58	4.5
Julio	19.1	3	10.2	3.7	1	SW	57	4.8
Agosto	20.7	4.1	11.6	4.8	0.8	SW	55	5.1
Setiembre	20.3	5.6	12.2	15.3	0.9	SW	55	5.4
Octubre	19.3	6.7	12	55.3	0.7	SW	55	5.8
Noviembre	20.7	7.2	13.1	101.7	0.7	SW	56	5.9
Diciembre	18.6	7.3	12.1	143	0.7	SW	62	5.7
Promedio	19.2	5.8	11.6	Total año: 740.4	0.73	SW	61	5.2

Fuente: Estación Meteorológica CECADE (2007-2014)



Foto 8: Ubicación de los instrumentos de medición (Piranómetro).



Foto 9: Instrumento de medición de la Radiación Solar (Solarímetro).



Foto 10: Pozo artesanal de bombeo.



Foto 11: Tuberías de impulsión hasta 15 m de altura.

ANEXO 5: Datos registrados durante el periodo de evaluación del sistema de bombeo fotovoltaico

Día	Hora	Radiacion (W/m2)	Tension (V)	Corriente (I)	Potencia neta (W)	Altura de bombeo (m)	Volumen (lt)	Tiempo (seg)	Caudal (m3/s)	Caudal (m3/h)	Volumen diario (m3)
30-Ago	9:00 a. m.	797.289	36.00	3.98	143.28	10.00	5	15.21	0.000329	1.183	4.734
30-Ago	9:30 a. m.	797.289	37.00	3.70	136.90	10.00	5	12.67	0.000395	1.421	5.683
30-Ago	9:45 a. m.	817.221	36.00	4.39	158.04	10.00	5	13.27	0.000377	1.356	5.426
30-Ago	11:00 a. m.	1235.798	38.80	4.06	157.53	10.00	5	14.17	0.000353	1.270	5.081
30-Ago	11:15 a. m.	1215.866	38.00	4.11	156.18	10.00	5	14.51	0.000345	1.241	4.962
30-Ago	11:30 a. m.	1255.731	37.50	4.28	160.50	10.00	5	14.10	0.000355	1.277	5.106
30-Ago	11:45 a. m.	1235.798	35.40	4.38	155.05	10.00	5	13.40	0.000373	1.343	5.373
30-Ago	12:15 p. m.	1056.408	33.30	4.29	142.86	10.00	5	15.30	0.000327	1.176	4.706
30-Ago	12:30 p. m.	1036.476	33.90	5.20	176.28	10.00	5	15.29	0.000327	1.177	4.709
30-Ago	12:45 p. m.	976.679	31.50	4.90	154.35	10.00	5	15.41	0.000324	1.168	4.672
30-Ago	2:15 p. m.	857.086	32.20	4.26	137.17	10.00	5	16.40	0.000305	1.098	4.390
30-Ago	2:30 p. m.	857.086	32.20	4.24	136.53	10.00	5	16.12	0.000310	1.117	4.467
30-Ago	2:45 p. m.	857.086	32.10	4.24	136.10	10.00	5	14.76	0.000339	1.220	4.878
30-Ago	3:15 p. m.	578.035	33.60	2.63	88.37	10.00	5	20.86	0.000240	0.863	3.452
30-Ago	3:30 p. m.	597.967	33.50	2.68	89.78	10.00	5	22.88	0.000219	0.787	3.147
30-Ago	3:45 p. m.	578.035	34.80	2.63	91.52	10.00	5	22.92	0.000218	0.785	3.141
31-Ago	9:00 a. m.	677.696	32.90	3.80	125.02	10.00	5	14.70	0.000340	1.224	4.898
31-Ago	9:30 a. m.	697.628	32.50	3.99	129.68	10.00	5	16.46	0.000304	1.094	4.374
31-Ago	9:45 a. m.	697.628	33.40	4.00	133.60	10.00	5	19.26	0.000260	0.935	3.738
31-Ago	10:15 a. m.	1036.476	34.60	4.39	151.89	10.00	5	15.94	0.000314	1.129	4.517
31-Ago	10:30 a. m.	1056.408	32.10	4.23	135.78	10.00	5	17.69	0.000283	1.018	4.070
31-Ago	10:45 a. m.	1056.408	34.90	4.41	153.91	10.00	5	14.97	0.000334	1.202	4.810
31-Ago	11:15 a. m.	1076.340	33.50	4.33	145.06	10.00	5	14.85	0.000337	1.212	4.848
31-Ago	11:30 a. m.	1076.340	33.40	4.32	144.29	10.00	5	16.67	0.000300	1.080	4.319
31-Ago	11:45 a. m.	1036.476	33.30	4.32	143.86	10.00	5	14.44	0.000346	1.247	4.986
31-Ago	12:15 p. m.	1056.408	32.50	4.60	149.50	10.00	5	13.01	0.000384	1.384	5.534
31-Ago	12:30 p. m.	1056.408	32.90	4.53	149.04	10.00	5	13.79	0.000363	1.305	5.221
31-Ago	12:45 p. m.	1056.408	33.30	4.54	151.18	10.00	5	14.00	0.000357	1.286	5.143
31-Ago	2:15 p. m.	777.357	35.00	3.93	137.55	10.00	5	13.84	0.000361	1.301	5.202
31-Ago	2:30 p. m.	617.899	34.30	2.79	95.70	10.00	5	14.76	0.000339	1.220	4.878
31-Ago	2:45 p. m.	737.493	33.50	3.75	125.63	10.00	5	15.67	0.000319	1.149	4.595

Día	Hora	Radiación (W/m2)	Tension (V)	Corriente (I)	Potencia neta (W)	Altura de bombeo (m)	Volumen (lt)	Tiempo (seg)	Caudal (m3/s)	Caudal (m3/h)	Volumen diario (m3)
1-Set	9:00 a. m.	956.747	31.90	2.88	91.87	10.00	5	20.56	0.000243	0.875	3.502
1-Set	9:30 a. m.	677.696	33.00	3.89	128.37	10.00	5	23.18	0.000216	0.777	3.106
1-Set	9:45 a. m.	877.018	35.10	4.38	153.74	10.00	5	14.82	0.000337	1.215	4.858
1-Set	10:15 a. m.	1036.476	34.40	4.34	149.30	10.00	5	13.44	0.000372	1.339	5.357
1-Set	10:30 a. m.	1036.476	34.20	4.34	148.43	10.00	5	13.11	0.000381	1.373	5.492
1-Set	10:45 a. m.	1036.476	34.40	4.34	149.30	10.00	5	12.41	0.000403	1.450	5.802
1-Set	11:15 a. m.	1076.340	33.80	4.36	147.37	10.00	5	14.03	0.000356	1.283	5.132
1-Set	11:30 a. m.	1076.340	33.80	4.33	146.35	10.00	5	14.30	0.000350	1.259	5.035
1-Set	11:45 a. m.	1076.340	33.80	4.33	146.35	10.00	5	13.71	0.000365	1.313	5.252
1-Set	12:15 p. m.	1076.340	34.20	4.30	147.06	10.00	5	13.98	0.000358	1.288	5.150
1-Set	12:30 p. m.	1076.340	34.00	4.36	148.24	10.00	5	14.90	0.000336	1.208	4.832
1-Set	12:45 p. m.	1076.340	34.00	4.35	147.90	10.00	5	14.17	0.000353	1.270	5.081
2-Set	9:00 a. m.	677.696	32.80	3.72	122.02	10.00	5	15.13	0.000330	1.190	4.759
2-Set	9:30 a. m.	677.696	32.70	3.72	121.64	10.00	5	15.60	0.000321	1.154	4.615
2-Set	9:45 a. m.	697.628	31.50	3.83	120.65	10.00	5	15.74	0.000318	1.144	4.574
2-Set	10:15 a. m.	617.899	33.50	3.78	126.63	10.00	5	20.62	0.000242	0.873	3.492
2-Set	10:30 a. m.	976.679	34.60	2.13	73.70	10.00	5	14.56	0.000343	1.236	4.945
2-Set	10:45 a. m.	1176.002	38.00	3.99	151.62	10.00	5	13.39	0.000373	1.344	5.377
2-Set	11:15 a. m.	1076.340	34.20	4.31	147.40	10.00	5	12.80	0.000391	1.406	5.625
2-Set	11:30 a. m.	1076.340	34.20	4.32	147.74	10.00	5	14.43	0.000347	1.247	4.990
2-Set	11:45 a. m.	1056.408	34.30	4.32	148.18	10.00	5	13.06	0.000383	1.378	5.513
2-Set	12:15 p. m.	558.102	31.20	1.68	52.42	10.00	5	15.88	0.000315	1.134	4.534
2-Set	12:30 p. m.	438.509	33.90	2.17	73.56	10.00	5	24.61	0.000203	0.731	2.926
2-Set	12:45 p. m.	1036.476	37.50	4.06	152.25	10.00	5	20.38	0.000245	0.883	3.533
2-Set	2:15 p. m.	797.289	33.10	4.27	141.34	10.00	5	13.51	0.000370	1.332	5.329
2-Set	2:30 p. m.	797.289	32.80	4.27	140.06	10.00	5	15.02	0.000333	1.198	4.794
2-Set	2:45 p. m.	597.967	32.70	3.44	112.49	10.00	5	17.36	0.000288	1.037	4.147

Dia	Hora	Radiacion (W/m ²)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Potencia neta (W)
3-Set	8:30 a. m.	318.92	42.20	0.02	0.84
3-Set	9:00 a. m.	657.76	33.20	3.57	118.52
3-Set	9:30 a. m.	398.64	34.70	2.28	79.12
3-Set	10:00 a. m.	697.63	31.70	2.52	79.88
3-Set	10:30 a. m.	1116.20	35.60	4.35	154.86
3-Set	11:00 a. m.	1136.14	35.40	4.34	153.64
3-Set	11:30 a. m.	1255.73	35.40	4.39	155.41
3-Set	12:00 p. m.	936.81	33.70	3.94	132.78
3-Set	12:30 p. m.	1116.20	32.00	2.69	86.08
3-Set	1:00 p. m.	1096.27	34.50	3.85	132.83
3-Set	1:30 p. m.	1016.54	34.20	4.33	148.09
3-Set	2:00 p. m.	717.56	39.80	0.02	0.80
3-Set	2:30 p. m.	17.94	38.40	0.02	0.77
3-Set	3:00 p. m.	697.63	33.30	3.87	128.87
4-Set	8:30 a. m.	597.97	34.00	0.02	0.68
4-Set	11:00 a. m.	1116.20	34.30	4.23	145.09
4-Set	11:30 a. m.	1176.00	35.40	4.10	145.14
4-Set	12:00 p. m.	1195.93	34.30	4.25	145.78
4-Set	12:30 p. m.	1176.00	35.50	3.82	135.61
4-Set	1:00 p. m.	1096.27	34.20	3.90	133.38
4-Set	1:30 p. m.	159.46	39.10	0.02	0.78
4-Set	2:00 p. m.	976.68	36.90	4.14	152.77
4-Set	2:30 p. m.	777.36	32.90	4.13	135.88
4-Set	3:00 p. m.	657.76	34.60	2.82	97.57
5-Set	8:30 a. m.	617.90	35.20	3.22	113.34
5-Set	9:00 a. m.	757.42	32.90	4.08	134.23
5-Set	9:30 a. m.	857.09	34.30	4.17	143.03
5-Set	10:00 a. m.	1016.54	34.10	4.22	143.90
5-Set	10:30 a. m.	1116.20	35.20	4.33	152.42
5-Set	11:00 a. m.	1136.14	35.40	4.34	153.64
5-Set	11:30 a. m.	438.51	34.90	2.48	86.55
5-Set	12:00 p. m.	259.12	33.80	1.57	53.07
5-Set	12:30 p. m.	1156.07	37.50	4.08	153.00
5-Set	1:00 p. m.	239.19	33.80	1.69	57.12
5-Set	1:30 p. m.	119.59	40.10	0.02	0.80
5-Set	2:00 p. m.	59.80	39.50	0.02	0.79
5-Set	2:30 p. m.	79.73	39.80	0.02	0.80
5-Set	3:00 p. m.	99.66	40.50	0.02	0.81
6-Set	8:30 a. m.	637.83	34.60	3.48	120.41
6-Set	9:00 a. m.	757.42	32.40	4.04	130.90
6-Set	9:30 a. m.	837.15	34.30	4.16	142.69
6-Set	10:00 a. m.	956.75	34.40	4.19	144.14
6-Set	10:30 a. m.	1016.54	33.60	4.22	141.79
6-Set	11:00 a. m.	1076.34	34.70	4.23	146.78
6-Set	11:30 a. m.	1096.27	34.10	4.25	144.93
6-Set	12:00 p. m.	1096.27	33.80	4.21	142.30
6-Set	12:30 p. m.	1195.93	35.90	4.28	153.65
6-Set	1:00 p. m.	239.19	35.10	1.22	42.82
6-Set	1:30 p. m.	139.53	31.20	1.14	35.57
6-Set	2:00 p. m.	159.46	31.30	1.24	38.81
6-Set	2:30 p. m.	896.95	34.70	4.21	146.09
6-Set	3:00 p. m.	737.49	30.40	4.05	123.12

ANEXO 6: Cuadros de cálculos de la necesidad de agua de los cultivos característicos de Yaurisque.

1 Maíz amiláceo

	Descripción	Fórmula	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
A	Área Cultivada por mes (Has.)		0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110
B	Coefficiente de cultivo (kc)		1.200	0.950	0.350					0.900	0.400	0.700	1.000	1.200
C	Evapotranspiración potencial (mm/día)		3.534	3.631	3.604	3.619	3.378	2.985	3.273	3.669	3.958	4.083	4.321	3.767
D	Evapotranspiración real (mm/día)	(B*C)	4.241	3.449	1.261	1.400	0.000	0.000	0.000	3.302	1.583	2.858	4.321	4.521
E	Precipitación efectiva (mm/día)		5.097	5.036	2.897	1.400	0.339	0.077	0.135	0.168	0.540	1.890	2.670	4.419
F	Déficit de Humedad (mm/día)	(D-E)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.134	1.043	0.967	1.651	0.101
G	Eficiencia de riego (%)		0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
H	Requerimiento de agua (mm/día)	(F/G)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.687	1.227	1.138	1.943	0.119
I	Requerimiento de agua (m3/ha/día)	(10*H)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	36.870	12.271	11.382	19.429	1.193
J	Requerimiento de agua (m3/día)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.056	1.350	1.252	2.137	0.131

2 Quinua

	Descripción	Fórmula	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
A	Área Cultivada por mes (Has.)		0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095
B	Coefficiente de cultivo (kc)				0.500	1.000	1.200	1.200	1.000	0.550				
C	Evapotranspiración potencial (mm/día)		3.534	3.631	3.604	3.619	3.378	2.985	3.273	3.669	3.958	4.083	4.321	3.767
D	Evapotranspiración real (mm/día)	(B*C)	0.000	0.000	1.802	3.619	4.054	3.582	3.273	2.018	0.000	0.000	0.000	0.000
E	Precipitación efectiva (mm/día)		5.097	5.036	2.897	1.400	0.339	0.077	0.135	0.168	0.540	1.890	2.670	4.419
F	Déficit de Humedad (mm/día)	(D-E)	0.000	0.000	0.000	2.219	3.715	3.505	3.138	1.850	0.000	0.000	0.000	0.850
G	Eficiencia de riego (%)		0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
H	Requerimiento de agua (mm/día)	(F/G)	0.000	0.000	0.000	2.611	4.371	4.124	3.691	2.176	0.000	0.000	0.000	0.000
I	Requerimiento de agua (m3/ha/día)	(10*H)	0.000	0.000	0.000	26.107	43.711	41.235	36.915	21.764	0.000	0.000	0.000	0.000
J	Requerimiento de agua (m3/día)		0.000	0.000	0.000	2.480	4.153	3.917	3.507	2.068	0.000	0.000	0.000	0.000

3 Oca

	Descripción	Fórmula	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
A	Área Cultivada por mes (Has.)		0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110
B	Coefficiente de cultivo (kc)					0.600	0.550	1.000	1.000	0.700	0.800			
C	Evapotranspiración potencial (mm/día)		3.534	3.631	3.604	3.619	3.378	2.985	3.273	3.669	3.958	4.083	4.321	3.767
D	Evapotranspiración real (mm/día)	(B*C)	0.000	0.000	0.000	2.171	1.858	2.985	3.273	2.568	3.166	0.000	0.000	0.000
E	Precipitación efectiva (mm/día)		5.097	5.036	2.897	1.400	0.339	0.077	0.135	0.168	0.540	1.890	2.670	4.419
F	Déficit de Humedad (mm/día)	(D-E)	0.000	0.000	0.000	0.771	1.519	2.908	3.138	2.400	2.626	0.000	0.000	0.000
G	Eficiencia de riego (%)		0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
H	Requerimiento de agua (mm/día)	(F/G)	0.000	0.000	0.000	0.908	1.788	3.421	3.691	2.824	3.090	0.000	0.000	0.000
I	Requerimiento de agua (m3/ha/día)	(10*H)	0.000	0.000	0.000	9.076	17.876	34.212	36.915	28.238	30.896	0.000	0.000	0.000
J	Requerimiento de agua (m3/día)		0.000	0.000	0.000	0.998	1.966	3.763	4.061	3.106	3.399	0.000	0.000	0.000

4 Haba Verde

	Descripción	Fórmula	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
A	Área Cultivada por mes (Has.)		0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090
B	Coefficiente de cultivo (kc)					0.350	0.650	1.150	1.150	1.100	0.750			
C	Evapotranspiración potencial (mm/día)		3.534	3.631	3.604	3.619	3.378	2.985	3.273	3.669	3.958	4.083	4.321	3.767
D	Evapotranspiración real (mm/día)	(B*C)	0.000	0.000	0.000	1.267	2.196	3.432	3.764	4.035	2.968	0.000	0.000	0.000
E	Precipitación efectiva (mm/día)		5.097	5.036	2.897	1.400	0.339	0.077	0.135	0.168	0.540	1.890	2.670	4.419
F	Déficit de Humedad (mm/día)	(D-E)	0.000	0.000	0.000	0.000	1.857	3.356	3.629	3.868	2.428	0.000	0.000	0.000
G	Eficiencia de riego (%)		0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
H	Requerimiento de agua (mm/día)	(F/G)	0.000	0.000	0.000	0.000	2.185	3.948	4.269	4.550	2.857	0.000	0.000	0.000
I	Requerimiento de agua (m3/ha/día)	(10*H)	0.000	0.000	0.000	0.000	21.851	39.479	42.691	45.501	28.567	0.000	0.000	0.000
J	Requerimiento de agua (m3/día)		0.000	0.000	0.000	0.000	1.967	3.553	3.842	4.095	2.571	0.000	0.000	0.000

ANEXO 7: Potencial energético de radiación solar en el Perú. Pedro Zanabria Pacheco, X Simposio Peruano de Energía Solar. Noviembre 2003.

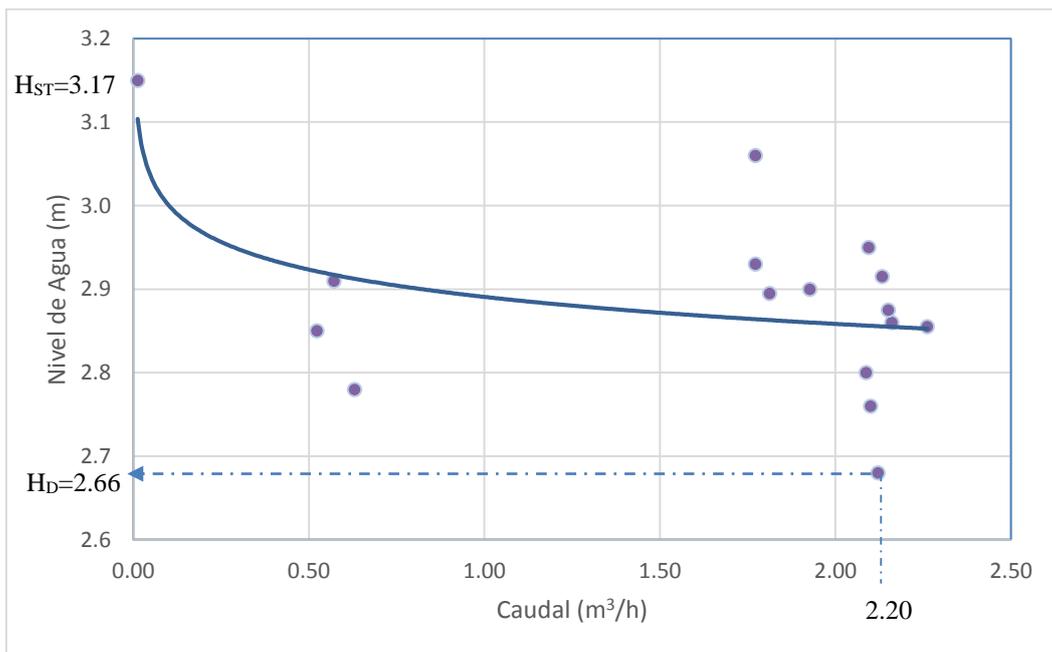


ANEXO 8: Metodología del diseño para el sistema de bombeo fotovoltaico estudiado.

A. Características del pozo

El pozo es el primer elemento a evaluar. En nuestro caso, las características del pozo artesanal evaluado son de 6 m de profundidad y 1.6 m de diámetro, ubicado a 25 m de la quebrada del río Yaurisque. El nivel del agua estática (H_{ST}) es de 3.17 m desde fondo del pozo. En las pruebas con la bomba de caudal variable (Gráfica 20), el pozo dio un caudal de trabajo promedio de 1.4 m³/h con un abatimiento promedio de 0.52 m, dando un máximo caudal de 2.2 m³/h, con una bomba ubicada a 1 m del fondo. Dicho comportamiento y diagrama del pozo se muestran en los siguientes graficos:

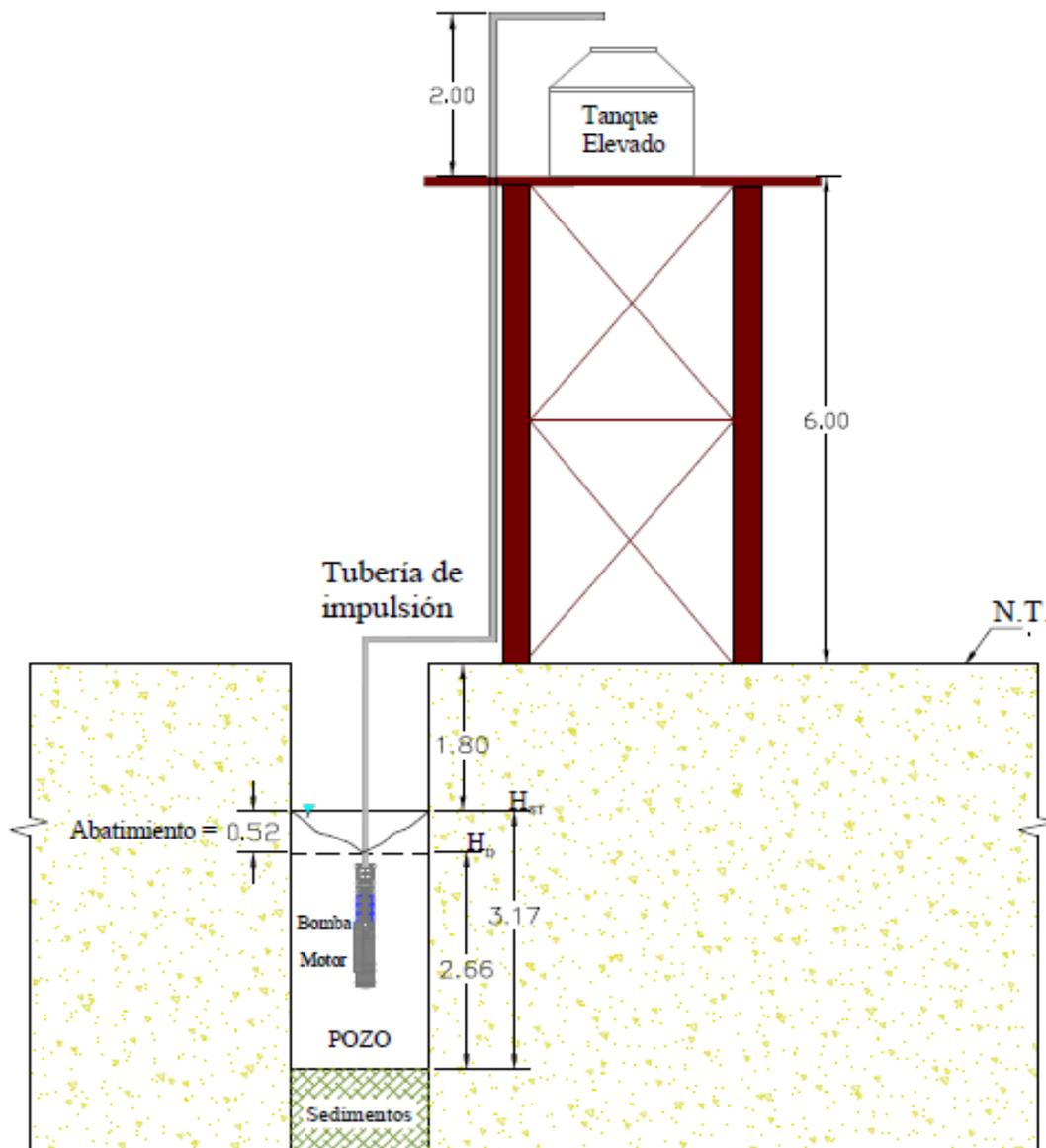
Gráfico 20: Niveles de abatimiento del pozo bajo diferentes caudales.



En la gráfica 21, se muestra los principales componentes hidráulicos: H_{ST} = nivel estático, H_{DT} = nivel dinámico de trabajo, H_T = altura tanque, y H_f = pérdidas de carga, resultando una CDT (carga dinámica total) de 10m.

$$CDT = H_{ST} + H_{DT} + H_T + H_f$$

Gráfico 21: Diagrama de diseño del pozo en condiciones normales de trabajo.



El caudal de trabajo de $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ se obtuvo con una radiación de $800 \text{ a } 1,000 \text{ W/m}^2$, en un periodo de 4 horas al día (10 am - 2 pm).

B. Bomba

Para las condiciones del pozo y del tanque elevado, con una CDT de 10 m, y un caudal de trabajo $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ (23 l/min), será necesario una bomba de poca capacidad, que la marca FIASA la ofrece, ver cuadro adjunto.

Cuadro 15: Modelos de bombas solares según el caudal y altura de descarga.



BOMBAS SUMERGIBLES SOLARES - TABLA DE REFERENCIA PARA APLICACIONES BÁSICAS

Sis. No	Altura Descarga H (m)	BOMBA SUMERGIBLE SOLAR			Caudal máximo (l/min)	Caudal en m ³ /día p/radiación solar (en kWh/m ² .día) de:			Potencia Recomendada en Paneles Solares (Wp)			
		Modelo	Diámetro Salida (")	Diámetro Perf. (")		Cable (Nxmm ²)	4,5	6	7,5	Total	Config.	U _{nom} (V)
1	5 - 15	TBST 20/180-24	3/4	4	3x1,5	10,0	2,4	3,2	4	130	1x1x130	24
2	15 - 20	TBST 20/180-24	3/4	4	3x1,5	11,3	3,0	4,0	5,0	150	1x1x150	24
3	10 - 20	TBST 40/320-36	3/4	4	3x1,5	20,1	7,8	10,3	12,9	300	1x1x300	36
4	20 - 30	TBST 40/320-36	3/4	4	3x1,5	17,4	5,7	7,8	9,5	300	1x1x300	36
5	30 - 40	TBST 60/500-48	1	4	3x2,5	30,0	11,4	15,2	19,0	600	1x2x300	48
6	40 - 50	TBST 60/500-48	1	4	3x2,5	21,7	8,2	11,0	13,8	600	1x2x300	48
7	50 - 60	TBST 80/500-48	3/4	4	3x2,5	15,8	6,0	8,0	10,0	600	1x2x300	48
8	60 - 70	TBST 80/500-48	3/4	4	3x2,5	11,7	4,4	5,9	7,4	600	1x2x300	48
9	5 - 10	TBSC 30/500-48	1 1/4	4	3x2,5	100	38,0	50,6	63,3	300	1x2x300	48
10	10 - 15	TBSC 30/500-48	1 1/4	4	3x2,5	70,0	26,5	35,4	44,4	300	1x2x300	48
11	15 - 20	TBSC 50/500-48	1 1/4	4	3x2,5	50,0	19,0	25,3	31,6	300	1x2x300	48
12	20 - 25	TBSC 50/500-48	1 1/4	4	3x2,5	41,7	15,9	21,1	26,4	300	1x2x300	48
13	50 - 60	TBSC 80/1000-110	1 1/4	4	3x2,5	50,0	15,0	20,0	25,0	1800	2x3x300	72
14	70 - 80	TBSC 90/1000-110	1 1/4	4	3x4	25,0	7,5	10,0	12,4	1800	2x3x300	72
15	80 - 90	TBSC 90/1000-110	1 1/4	4	3x4	18,3	5,6	7,3	9,1	1800	2x3x300	72
16	90 - 100	TBSC 125/1500-150	1 1/4	4	3x6	30,0	9,0	12,0	15,0	2400	2x4x300	96
17	100 - 110	TBSC 125/1500-150	1 1/4	4	3x6	29,0	8,8	11,7	14,5	2400	2x4x300	96
18	110 - 120	TBSC 125/1500-150	1 1/4	4	3x6	26,6	8,0	10,7	13,3	2400	2x4x300	96
19	5 - 15	TBSC 50/1500-150	2	4	3x2,5	283	84,9	113,2	141,5	2400	2x4x300	96
20	15 - 25	TBSC 50/1500-150	2	4	3x4	217	64,9	86,6	108,2	2400	2x4x300	96
21	25 - 40	TBSC 70/1500-150	2	4	3x4	133	40,0	53,3	66,6	2400	2x4x300	96
22	40 - 50	TBSC 70/1500-150	2	4	3x4	83	25,0	33,3	41,6	2400	2x4x300	96
23	10 - 20	TBSC 50/3000-300	3	5	3x4	517	154,8	206,5	258,1	4800	2x8x300	192
24	20 - 30	TBSC 50/3000-300	3	5	3x4	400	119,9	159,8	199,8	4800	2x8x300	192
25	30 - 40	TBSC 50/3000-300	3	5	3x4	283	84,9	113,2	141,5	4800	2x8x300	192
26	30 - 50	TBSC 120/3000-300	2	4	3x6	153	46,0	61,3	76,6	4800	2x8x300	192
27	50 - 70	TBSC 120/3000-300	2	4	3x6	125	37,4	50,0	62,4	4800	2x8x300	192
28	70 - 90	TBSC 120/3000-300	2	4	3x6	100	30,0	40,0	50,0	4800	2x8x300	192
29	80 - 110	TBSC 200/3000-300	1 1/2	4	3x10	72	21,5	28,6	35,7	4800	2x8x335	192
30	110 - 140	TBSC 200/3000-300	1 1/2	4	3x10	65	19,4	26,0	32,4	4800	2x8x300	192
31	140 - 160	TBSC 200/3000-300	1 1/2	4	3x10	47	14,0	18,6	23,3	4800	2x8x300	192

(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i) (j) (k) (l) (m) (n) (o) (p) (q)

(a) Sistema N°; (b) Altura total en metros de columna de agua = Nivel dinámico + elevación + pérdidas de carga; (c) Modelo de Bomba; (d) Diámetro de la tubería de salida; (e) Diámetro de la perforación; (f) Cable de alimentación; (g) Caudal instantáneo máximo con la potencia indicada en (k); (h) Caudal en m³/día para radiación solar constante de 1000 W/m² en 4,5 horas; (i) Ídem (h) para 6 horas; (j) Ídem (h) para 7,5 horas; (k) Potencia total a instalar; (l) Configuración típica sugerida; (m) Tensión nominal del ensamble de paneles solares; (n) Precio de la Bomba; (o) Precio de los Paneles Solares (opcional); (q) Precio del Conjunto (Bomba + Paneles) (sin soportes)

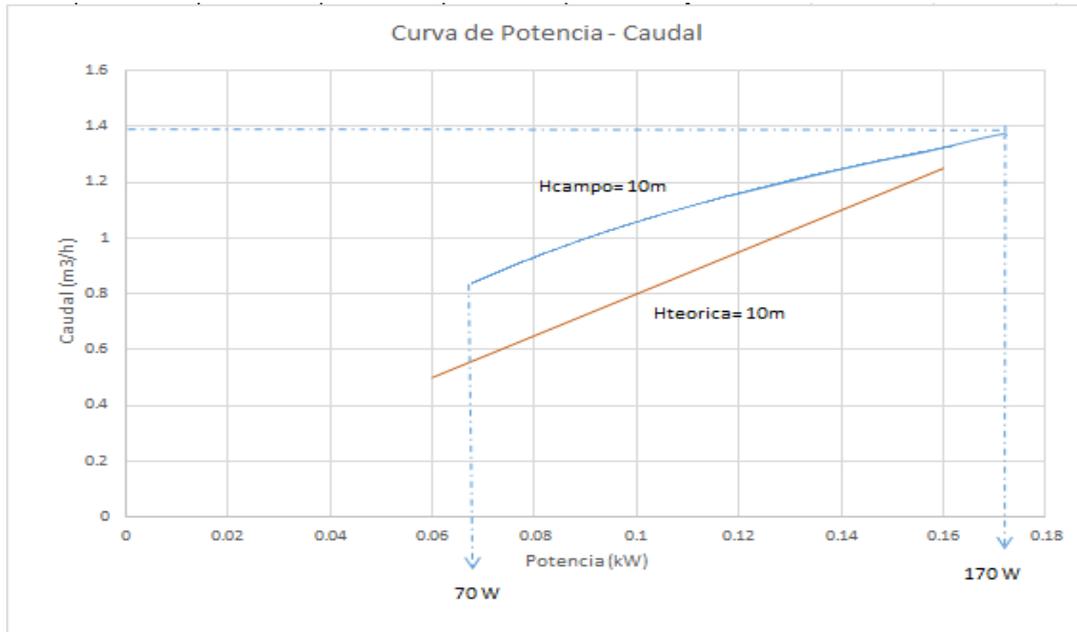
Fuente: Fiasa (2017)

Del cuadro 15, se escoge una bomba TBST 40/320–36 para una CDT de 10-20 m, y un caudal de 1.4 m³/h (20.1 l/min), que trabajara con una potencia pico de paneles de 300 W a 36V.

Otra forma de determinar la potencia de la bomba, es en base a la curva de potencia-caudal de las bombas Lorentz, de acuerdo al gráfico continuo; la potencia deberá estar

entre 70 W a 170 W, donde se deberá escoger la bomba que más se aproxime al máximo de potencia.

Gráfico 22: Curva de potencia necesaria para diferentes caudales a una altura de 10 m en bombas Lorentz.



C. Módulo Fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos se diseñan de acuerdo a la potencia requerida por la bomba, que pare el caso de la marca Fiasa; se necesitan 300Wp, que podrían estar distribuidos en dos módulos de 150 Wp cada uno, debido a que la mayoría de fabricantes tienen módulos que trabajan a un máximo de 250 Wp.

D. Diseño óptimo

Finalmente; para las condiciones del pozo y tanque elevado (CDT=10m), con un caudal de trabajo promedio de 1.4 m³/h. Se necesitará una bomba FIASA modelo TBST 40/320-36, que trabajará con una CDT entre 10-20m, con dos módulos fotovoltaicos de 150 Wp cada uno.