



UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

III PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL EXTRAORDINARIA

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**“DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE BOMBEO
FOTOVOLTAICO PARA SUMINISTRAR AGUA EN EL
CASERÍO CHILLVACA EN EL DISTRITO DE INCAHUASI-
FERREÑAFE - LAMBAYEQUE”**

Autor:

Bach. LARRY JAROL CHONTO VERA

Asesor:

Dr. CARRANZA MONTENEGRO DANIEL

LAMBAYEQUE – PERÚ

Julio del 2018



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

VI PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL EXTRAORDINARIA

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**“DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE BOMBEO
FOTOVOLTAICO PARA SUMINISTRAR AGUA EN EL
CASERÍO CHILLVACA EN EL DISTRITO DE INCAHUASI-
FERREÑAFE - LAMBAYEQUE”**

Autor:

Bach. LARRY JAROL CHONTO VERA

Aprobado por el Jurado Examinador

PRESIDENTE : Msc. Segundo Abelardo Horna Torres

SECRETARIO : Dr. Jorge Luis Nombera Temoche

VOCAL : Ing. Teobaldo Edgar Julca Orozco

ASESOR : Dr. Daniel Carranza Montenegro

Lambayeque – Perú

Julio de 2018



UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

III PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL EXTRAORDINARIA

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

TITULO

“DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO PARA SUMINISTRAR AGUA EN EL CASERÍO CHILLVACA EN EL DISTRITO DE INCAHUASI-FERREÑAFE - LAMBAYEQUE”

CONTENIDOS

CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES.

AUTOR: Bach. LARRY JAROL CHONTO VERA

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

ASESOR

Lambayeque – Perú

Julio del 2018

DEDICATORIA

Dedicar este trabajo en Principio a Dios, por darme la vida y permitirme llegar hasta este momento en ser Profesional, al tener buena salud y lograr mis metas, así mismo de su infinito amor y bondad.

A mis padres Milagros y Cesar, por haber creído en mí, dándome su apoyo incondicional, inculcándome valores con el ejemplo, impulsándome en los momentos críticos de esta etapa, a ellos para que se sientan orgullosos de complacidos de tener como hijo a un Ingeniero Mecánico Electricista.

También quiero dedicar este momento a mi hija Ximena, quien se a convertido en mi vida y en el motivo de seguir adelante. Cada día.

¡Gracias a ustedes!

AGRADECIMIENTO

A los Docentes de la Facultad de ingeniería Mecánica y Eléctrica-UNPRG, en especial al Dr. Carranza Montenegro Daniel, por creer en mí, por sus consejos y los momentos gratos que pasamos en las asesorías y dudas presentadas en la elaboración de este examen de suficiencia profesional.

RESUMEN

El motivo principal del presente trabajo de suficiencia profesional fue el diseño de un sistema fotovoltaico para el bombeo de agua (selección de paneles fotovoltaicos, controladores, elementos de protección, etc.), 85 personas proyectas, además de animales en el caserío Chillvaca, ubicado en el Distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, en la región Lambayeque, El volumen de agua diaria requerida es de 11 610 L, con la finalidad de suministrar agua a la población y también a los animales debido a la problemática de que las personas usan el agua de las lluvias o de pozos poco profundos que después de un periodo de tiempo se secan. Por lo que la integración de un sistema de bombeo de agua utilizando tecnología fotovoltaica tiene justificación. Se seleccionó el sistema fotovoltaico estará conformado por 8 paneles fotovoltaicos de 190 Wp de potencia cada uno, 01 controlador PS-1800, 01 tablero eléctrico para sistema solar, 02 estructura para 4 paneles fotovoltaicos. El presupuesto referencial es de S/. 37 060,35

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, **paneles solares**, bomba sumergible.

ABSTRACT

The main motive of the present work of professional sufficiency was the design of a photovoltaic system for the pumping of water (selection of photovoltaic panels, controllers, protection elements, etc.), 85 projected people, in addition to animals in the Chillvaca farmhouse, located in the District of Incahuasi, province of Ferreñafe, in the Lambayeque region, The daily water volume required is 11 610 L, with the purpose of supplying water to the population and also to the animals due to the problem that people use rainwater or shallow wells that dry after a period of time. Therefore, the integration of a water pumping system using photovoltaic technology is justified. The photovoltaic system will be made up of 8 photovoltaic panels of 190 Wp each, 01 controller PS-1800, 01 electrical panel for solar system, 02 structure for 4 photovoltaic panels. The reference budget is S / . 37 060,35

Keywords: Photovoltaic solar energy, solar panels, submersible pump.

ÍNDICE

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
INTRODUCCIÓN	XI
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Problema de investigación.....	1
1.2. Realidad Problemática	2
1.3. Formulación del Problema.....	2
1.4. Delimitación de la Investigación	3
1.4.1. Delimitación espacial	3
1.4.2. Delimitación temporal	6
1.5. Justificación e Importancia de la Investigación	6
1.6. Limitaciones de la Investigación	7
1.7. Objetivos	8
1.7.1. Objetivo General	8
1.7.2. Objetivo Específicos	8
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes de Estudios	9
2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema desarrollado	14
2.2.1. Radiación solar	14
2.2.2. Bombeo solar fotovoltaico	29
2.3. Definición conceptual de la terminología empleada.	58
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	64
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	64
3.2. Población y muestra.....	64
3.3. Hipótesis	64
3.4. Variables - Operacionalización	64

3.5. Métodos y Técnicas de investigación	66
3.6. Descripción de los instrumentos utilizados.....	66
CAPITULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	68
4.1. Propuesta de la investigación	68
4.1.1. Equipamiento de la propuesta	68
CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	69
5.1. Evaluación de la energía solar disponible	69
5.2. Población y vivienda actual y proyección para el caserío Chillvaca en Incahuasi-Ferreñafe	72
5.3. Requerimientos del sistema de bombeo.....	73
5.3.1. Calculo de la energía hidráulica necesaria	73
5.3.2. Carga dinámica total	74
5.3.3. Calculo del caudal	75
5.3.4. Calculo de la potencia de la bomba sumergible	75
5.3.5. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	78
5.3.6. Presupuesto referencial del sistema fotovoltaico para bombeo de agua	90
CAPITULO VI: CONCLUSIONES	92
6.1. Conclusiones.....	92
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXO A. RADIACIÓN SOLAR EN LAMBAYEQUE- MAPA SOLAR DEL PERÚ....	95
ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA SUMERGIBLE PS2-1800 C-SJ3-18 LORENTZ	95
ANEXO C. FICHA TÉCNICA DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SELECCIONADOS	95
ANEXO D. CATALOGO DE CABLES THW-90	95
ANEXO E. PLANO DE EQUIPAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEO	95
ANEXO F. PLANO DE MONTAJE DE PANELES SOLARES	95
ANEXO G. CATALOGO DE FUSIBLES DF	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Diferencias entre los paneles según la tecnología del fabricante.....	25
Tabla N° 2: valores de la constante K usando la fórmula de Maning.....	38
Tabla N° 3: Principales características de las bombas fotovoltaicos	55
Tabla N° 4: Operacionalización de variables	65
Tabla N° 5: Radiación solar en el caserío Chillvaca-Incahuasi	70
Tabla N° 6: Datos de radiación solar según el Software Solarius Plus.....	71
Tabla N° 7: Tasa de crecimiento poblacional.....	72
Tabla N° 8: Tasa de crecimiento en el departamento de Lambayeque	73
Tabla N° 9: Necesidades hídricas de personas y animales	74
Tabla N° 10: Caída de tensión por cada tramo del sistema de bombeo fotovoltaico...	83
Tabla N° 11: Conductores eléctricos THW-90	85
Tabla N° 12: Sección mínima de los conductores de protección	86
Tabla N° 13: Sección del conductor de protección	86
Tabla N° 14: Modelos de fusibles.....	87
Tabla N° 15: Costo de inversión de un sistema de bombeo fotovoltaico	90
Tabla N° 16: Costo de inversión de la propuesta.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Ubicación de Ferreñafe en la región Lambayeque	3
Figura N° 2: ubicación del caserío Chillvaca en Incahuasi.....	6
Figura N° 3: Componentes de la radiación solar.....	15
Figura N° 4: Mapa de irradiación horizontal en Latinoamérica y el caribe	16
Figura N° 5: Mapa solar del Perú	20
Figura N° 6: Concepto de horas sol pico	22
Figura N° 7: Fabricación de la célula y del módulo fotovoltaico	23
Figura N° 8: tipos de paneles solares.....	24
Figura N° 9: Conexión en serie de módulos fotovoltaicos	27
Figura N° 10: Conexión en paralelo de módulos fotovoltaicos	28
Figura N° 11: Conexión serie/paralelo de módulos fotovoltaicos.....	28
Figura N° 12: Bombeo de agua con energía solar fotovoltaica	31
Figura N° 13: Caudal vs carga dinámica del sistema.....	35
Figura N° 14: Componentes hidráulicos de un sistema de bombeo de agua.....	36
Figura N° 15: Relación voltaje- corriente para cierto valor de irradiación solar.....	42
Figura N° 16: Bombas centrifugas de succión superficial	48
Figura N° 17: Bomba centrifuga superficial.....	49
Figura N° 18: Bomba centrifuga sumergible	50
Figura N° 19: Bomba volumétrica de cilindro.....	51
Figura N° 20: Bomba de diafragma sumergible	53
Figura N° 21: bomba LORENTZ PS2- 1800 C-SJ3-18	77
Figura N° 22: Curva característica de la bomba seleccionada	78

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este trabajo de suficiencia es el dimensionamiento de un sistema de bombeo de agua, el suministro de energía eléctrica a través de paneles solares fotovoltaicos y bombear agua desde un pozo para beneficio del caserío Chillvaca ubicado en el distrito de Incahuasi aprovechando así de esta manera la fuente inagotable de energía solar.

El sistema de bombeo fotovoltaico es una aplicación de especial interés en sistemas aislados, en lugares donde el acceso a la energía eléctrica a través del sistema eléctrico convencional resulta antieconómico para la empresa concesionaria.

En la mayor parte de los casos un sistema de bombeo fotovoltaico, resulta ser la solución más eficiente y económica es usar un sistema de bombeo en el que se conecta un generador fotovoltaico a un conjunto motor/bomba mediante un determinado dispositivo de acondicionamiento de potencia entre ambos, este tipo de instalación ofrece varias ventajas entre ellas que emplea una fuente de energía limpia y gratuita, su operación es automática y silenciosa, requiere poco mantenimiento y es amigable con el ambiente.

Esta aplicación, tiene amplias perspectivas de utilización en las áreas rurales donde algunos se carecen de suministro de energía eléctrica y su acometida requiere de grandes inversiones lo que puede coadyuvar al desarrollo del campo. Actualmente hay miles de sistemas de bombeo con energía fotovoltaica en operación de ranchos ganaderos y agrícolas alrededor del mundo. Los sistemas son confiables y económicamente competitivos para el productor rural.

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación

El problema del suministro y disponibilidad de agua en la población rural de nuestro país y la región una preocupación latente y cada vez más complicado, el crecimiento demográfico desordenado del medio rural hace que el consumo de agua potable sea cada vez mayor, motivo por el cual se debe suministrar de manera adecuada y racional.

En la actualidad urge la necesidad de reducir el consumo de electricidad proveniente de centrales que queman combustibles fósiles y de la fuerte dependencia que se crea en torno a ellos.

Con el empleo de paneles solares fotovoltaicos para el bombeo de agua subterránea se combinan los avances técnicos asociados a la electricidad (bombas eléctricas) junto con lo atractivo de contar con una fuente de energía autóctona y renovable.

Actualmente hay miles de sistemas de bombeo con energía fotovoltaica en operación de ranchos ganaderos y agrícolas alrededor del mundo. Los sistemas son confiables y económicamente competitivos para el productor rural.

1.2. Realidad Problemática

El caserío Chillvaca ubicado en el distrito de Incahuasi perteneciente a la provincia de Ferreñafe en la región Lambayeque cuenta con una población de 60 habitantes 25 viviendas, actualmente está aislada del sistema de distribución eléctrico nacional, este caserío cuenta con un problema y es de suministro de agua para personas y animales, algunas veces se utiliza el agua de la lluvia

La Profundidad de las aguas subterráneas en el área investigada fluctúa entre los 37m a 75m (fuente: http://www.cepes.org.pe/pdf/OCR/Partidos/evaluacion_recursos_chancay-lamb/evaluacion_recursos_hidricos_chancay-lambayeque.pdf)

Para hacer uso de este líquido se requiere de la instalación de bombas de agua para succionar y transportar el agua a la zona de cultivo, como para uso doméstico.

En zona rural no existe tendido de red eléctrica, por lo que hacer un tendido de una red eléctrica resultaría un poco costoso para un pequeño sistema de bombeo, es por ello la construcción de pozos que se encuentran equipados con sistemas fotovoltaicos.

1.3. Formulación del Problema

¿Utilizando la energía fotovoltaica será posible suministrar de agua al caserío Chillvaca ubicado en el distrito de Incahuasi en la provincia Ferreñafe, departamento de Lambayeque?

1.4. Delimitación de la Investigación

1.4.1. Delimitación espacial

La Provincia de Ferreñafe, se localiza en la zona norte del Perú, formando públicamente, parte de la Región Lambayeque, junto a las provincias de Chiclayo y Lambayeque (Figura N°.1)



Figura N° 1: Ubicación de Ferreñafe en la región Lambayeque

Fuente: <http://ferrenafesican.blogspot.pe/2011/08/1-vision-sintetica-de-ferrenafe.html>

Ubicación Política:

Región Lambayeque

Provincia: Ferreñafe

Distrito: Incahuasi

Caserío: Chillvaca

El Distrito de Ferreñafe tiene los siguientes límites

Por el Norte: Con el Distrito de Pítipo

Por el Sur: Con el Distrito de Picsi y Lambayeque.

Por Este: Con el Distrito de Mesones Muro.

Por el Oeste: Con el Distrito de Pueblo Nuevo

Distrito de Incahuasi¹

El caserío Chillvaca se encuentra ubicado en el distrito de Incahuasi el cual:

Debe su nombre a la ciudad de Incahuasi (*Inkawasi*), una antigua ciudad indígena situada a 3 100 metros sobre el nivel del mar. Pertenece a la región geográfica andina. La mayoría de sus habitantes habla el quechua Inkawasi-Kañaris.

Ubicación: Se encuentra ubicada en la parte noreste del departamento a lo largo de la cuenca media alta del río La Leche, entre los paralelos 6° 05' 00" y 6° 24' 30" latitud sur y los meridianos 79° 16' 10" y 79° 30' 00" de longitud oeste, presentan alturas que van de los 310 a 4 000 metros sobre el nivel del mar.

La superficie es de aproximadamente 41,735 hectáreas, tiene 79 centros poblados rurales con categoría de caseríos.

Limites

Norte: Distrito de Kanaris.

Sur: Distrito de Pítipo.

¹ <http://www.muniferrenafe.gob.pe/index.php/ferrenafe/distritos/53-incahuasi.html>

Este: Querecotillo y Miracosta en la región Cajamarca.

Oeste: Distrito de Salas.

Clima

El clima predominante es el típico de los valles de la vertiente occidental de los Andes Temperatura: La temperatura media anual varía entre 12° C a 17° C.

Recursos

Naturales

Se localizan en las márgenes del río Moyán con mayor predominancia en la zona de puna alta, donde la flora y la fauna son excelentes condiciones.

Flora

Existen bosques, arbustos, árboles y plantas medicinales (toronjil, manzanilla, romero, lauchi, uña de gato, culén, matico, etc.)

Fauna

Entre las principales variedades sobresalen: sajino, venados, perdiz, pava aliblanca, iguanas, culebras verdes, etc.

Folklore

El folklore tradicional aún se conserva. El huayno y la marinera son sus bailes típicos. Son usuales las danzas, los cantos interpretados con alegría y sentimientos con ocasión de las festividades religiosas, cívicas o festividades folclóricas (El Taking). En cada caserío se celebran fiestas religiosas, que en mucho de los casos en honor al patrón del lugar, las mismas que concentran a su población y a la de los pueblos aledaños para el acto celebratorio, por lo general cada fiesta tiene un período de duración de 3 a 4 días.

El caserío Chillvaca se encuentra ubicado en las coordenadas:

Latitud: -6, 1216900000

Longitud: -79. 3321400000



Figura N° 2: ubicación del caserío Chillvaca en Incahuasi

Fuente: <http://organiclifeperu.blogspot.pe/2015/10/lambayeque-peru-produce.html>

1.4.2. Delimitación temporal

Este examen de suficiencia tuvo una duración de 3 meses, en la cual participaron los pobladores del caserío Chillvaca en el distrito de Incahuasi.

1.5. Justificación e Importancia de la Investigación

La integración de un sistema de bombeo de agua utilizando tecnología fotovoltaica tiene justificación:

Justificación ambiental

Este examen de suficiencia se justifica debido a que el uso de la energía solar no produce emisiones de gases contaminantes al medio ambiente.

Justificación económica

Esta investigación promoverá nuevas formas de trabajo y actividades económicas al os pobladores del caserío Chillvaca en el distrito de Incahuasi. Con este proyecto se logrará un aumento del desarrollo socioeconómico y productivo del distrito de Incahuasi perteneciente a la región Lambayeque.

Justificación Científica

Este examen de suficiencia tiene como finalidad fomentar el uso de estas energías no convencionales como es ente caso la energía solar fotovoltaica.

Justificación Social

El trabajo de investigación tiene como beneficio mejorará la calidad de vida de los pobladores del caserío Chillvaca pues se dejará de utilizar fuentes de agua superficial que son perjudiciales para las saludes.

1.6. Limitaciones de la Investigación

Desconocimiento por parte de los pobladores con respecto al sistema de bombeo de agua utilizando paneles solares.

Difícil acceso, ausencia de transporte para llegar al lugar del proyecto, la vía de acceso es camino de herradura.

Con respecto a los datos de radiación solar el estudio se ha limitado a los datos obtenidos de la NASA, al atlas solar del SENAMHI del 2003 y el software SOLARIUS PLUS

Escasa bibliografía para el dimensionamiento de sistemas de bombeo fotovoltaicos.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Dimensionar un sistema fotovoltaico para el bombeo de agua el caserío Chillvaca ubicado en el distrito de Incahuasi perteneciente a la provincia de Ferreñafe -Lambayeque.

1.7.2. Objetivo Específicos

- a) Calcular la demanda de agua promedio diaria en el caserío Chillvaca.
- b) Evaluar la radiación solar disponible en el caserío.
- c) Dimensionar el sistema de bombeo fotovoltaico.
- d) Determinar el presupuesto técnico del sistema de bombeo fotovoltaico.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Estudios

Cito a los siguientes autores en cada uno de los contextos siguientes:

Contexto Internacional

Alvares Arboleada (2017, pág. 54), En su tesis de grado titulado “Análisis de un sistema de riego automatizado alimentado por energía fotovoltaica utilizando PLC “ nos dice el proyecto cumple con las exigencias planteadas utilizando recursos naturales mediante el uso de paneles fotovoltaicos como fuente de energía para el bombeo y abastecimiento del agua que sirve para el consumo, y riego de los cultivos en zonas rurales donde carecen de suministro de energía eléctrica y agua potable. Los paneles fotovoltaicos es una clara muestra de energía alternativa siendo estos más viables y estables para alimentar el sistema de bombeo abaratando costos a largo plazo teniendo una amplia ventaja sobre los sistemas de riego tradicionales que usan combustibles. Las bombas solares son considerablemente eficientes porque no requieren de baterías su función es bombear siempre y cuando exista radiación solar disponible en el lugar del proyecto.

Cabrera Peña & Fermin Montiel (2003, pág. 12) en su tesis titulado “Celdas fotovoltaicas para energizar un sistema de bombeo de agua”, en esta tesis explica que se realizó un análisis para la producción de la energía eléctrica a partir de los rayos del sol, que está basada en el fenómeno físico

denominado “Efecto Fotovoltaico”, que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados celdas fotovoltaicas. Se da a conocer que una de las aplicaciones de gran importancia de la energía solar fotovoltaica es el bombeo solar de agua, ya que estos están diseñados para el suministro de agua y riego en áreas retiradas donde no se dispone de un suministro de energía convencional, o esta no es fiable.

Con estos sistemas el agua puede ser bombeada durante el día y almacenada en tanques, con lo que estará disponible durante la noche y en los días nublado. La capacidad de almacenar el agua elimina la necesidad de baterías en el sistema. Esta configuración del sistema le da una característica más fiable y económica. (Cabrera Peña & Fermin Montiel, 2003)

Además, se realizó un análisis energético de un sistema de bombeo solar de agua con una potencia pico de 75 W, acoplado a una bomba monofásica, lo que permitió establecer las condiciones bajo las cuales el sistema se desempeña mejor (Carga Dinámica Total y litros producidos por día). Se llevaron a cabo mediciones de las variables involucradas en el sistema de bombeo fotovoltaico, tales como: voltaje y corriente consumida por la bomba, irradiancia incidente y el flujo de agua producido por día. (Cabrera Peña & Fermin Montiel, 2003)

Contexto nacional

Alata Rey (2015, pag. 2) en su tesis titulado “Dimensionamiento de un sistema de bombeo con paneles solares- caso UNALM” el autor no comunica que el bombeo de agua con energía solar fotovoltaica se ha vuelto una gran alternativa en las comunidades rurales y los sistemas aislados del país. Las primeras instalaciones en el Perú se remontan a 1978 donde se utilizaban motores de corriente continua de media y baja potencia (menores a 800W) directamente acoplados al generador fotovoltaico utilizando bombas centrífugas. Posteriormente, la inclusión de los motores de corriente alterna en la aplicación del bombeo fotovoltaico ofreció un avance en la tecnología de la electrónica, incrementando la fiabilidad y el rango de potencia de operación. Pero a pesar de las cuantiosas mejoras introducidas como convertidores AC/DC o inversores DC/AC todavía se sigue buscando la manera de optimizar los sistemas de bombeo fotovoltaico, su rendimiento, fiabilidad, el rango de potencia y una reducción en los costos.

Hoy en día, las necesidades básicas de agua establecen un consumo humano en áreas rurales en 20 litros/día aproximadamente. En las zonas rurales el mayor consumo de agua se produce para los sistemas de cultivos agrícolas así como en la alimentación de animales.

En resumen, el presente trabajo consiste en el dimensionamiento de un sistema de bombeo con paneles solares fotovoltaicos para una estación de bombeo de agua. La aplicación del presente estudio se desarrollará como un programa piloto para abastecer con agua a los servicios higiénicos de un pabellón de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Posteriormente

se aplicará en todo el campus y como referencia para las comunidades rurales en donde la universidad tiene un convenio establecido. (Alata Rey 2015)

Hernandez Quijaite (s.f., pag. 12) , en su trabajo de tesis “Bombeo de agua con energía solar en el departamento de Ica” da a conocer qué Para hacer uso de este líquido se requiere de la instalación de bombas de agua para succionar y transportar el agua a la zona de cultivo, en la cual en las zonas rurales el tendido de red eléctrica se encuentra en algunos casos a distancia considerables, para el cual hacer un tendido de una red eléctrica resultaría un poco costoso para un pequeño sistema de bombeo, cabe recalcar que aunque recurso hídrico de la costa peruana es escaso, la disponibilidad de agua durante el año es variable, es por ello la construcción de pozos que se encuentran equipados con sistemas convencionales de bombeo Diesel, especialmente en sistemas de menor potencia².

Contexto Local

Moran Santamaria (2013), en su tesis de Ingeniería titulado “Análisis y Evaluación para la Viabilidad Técnico Económico en el uso de la Energía Solar Fotovoltaica para el Centro Poblado Cruz de Pañalá – Distrito de Mórrope”; hace un estudio de electrificación con energía solar para el centro poblado Cruz de Pañalá, el cual carece de energía eléctrica de manera

² Hernandez Quijaite, Luis Eugenio. «Bombeo de agua con energía solar en el departamento de Ica.» Ica, s.f.

geográfica por tener limitaciones al acceso de redes eléctricas por su distancia, altos costos de transporte y recursos energéticos limitados, lo que hace tener un costo elevado en la generación de energía; el cual lo llevo a la evaluación de otros recursos de energía renovable y su rentabilidad.

En este estudio el autor concluye que en el centro poblado Cruz de Pañalá distrito de Mórrope, si es rentable implementar un Sistema Fotovoltaico para uso doméstico y productivo (en uso productivo se hizo el diseño de un sistema fotovoltaico para bombeo de agua) frente a otras alternativas de generación eléctrica como la convencional, por ser una zona aislada. Y de acuerdo a la evaluación económica, la inversión a realizar en beneficio de las 40 familias suministrando energía con sistemas fotovoltaicos es de S/. 393,154.87 y con la electrificación convencional es de S/. 1 584,052.88 la cual es muy superior³

³ Moran Santamaria, Jorge Maximo. «Análisis y Evaluación para la Viabilidad Técnico Económico en el uso de la Energía Solar Fotovoltaica para el Centro Poblado Cruz de Pañalá – Distrito de Mórrope.» Lambayeque, 2013.

2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema desarrollado

2.2.1. Radiación solar

Según Campuzano Bautista (2016, pag. 10)_nos explica:

Radiación.

Radiación Solar: La radiación solar es la energía electromagnética que mana en los procesos de fusión del hidrógeno (en átomos de helio) contenido en el sol.

La energía solar que en un año llega a la tierra a través de la atmósfera es de tan sólo aproximadamente 1/3 de la energía total interceptada por la tierra fuera de la atmósfera y, de ella, el 70 % cae en los mares. Sin embargo, la energía que queda, de $1,52 \times 10^{17}$ kWh, que en un año cae sobre la tierra firme, es igual a varios miles de veces el consumo total energético mundial actual.

La radiación solar (flujo solar o densidad de potencia de la radiación solar) recogida *fuera de la atmósfera* sobre una superficie perpendicular a los rayos solares es conocida como *constante solar* y es igual a $1\,366 \text{ W/m}^2$ variable durante el año un 3 % a causa de la electricidad de la órbita terrestre.

Horas Sol Pico: es el número de horas de sol que con una radiación global de $1\,000 \text{ W/m}^2$ proporciona una energía equivalente a la radiación global recibida en un período de tiempo.

Albedo o Reflectancia: es la relación entre la radiación reflejada por una superficie la que incide sobre ella.

Componentes de la radiación solar

Radiación Solar Directa: es la radiación solar por unidad de tiempo y unidad de área, que, sin haber sufrido modificación en su trayectoria, incide sobre una superficie.

Radiación Solar Reflejada: es la radiación por unidad de tiempo y unidad de área que, procedente de la reflexión de la radiación solar en el suelo y otros objetos, incide sobre una superficie.

Radiación Difusa: es la suma de la radiación difusa celeste y la radiación solar reflejada.

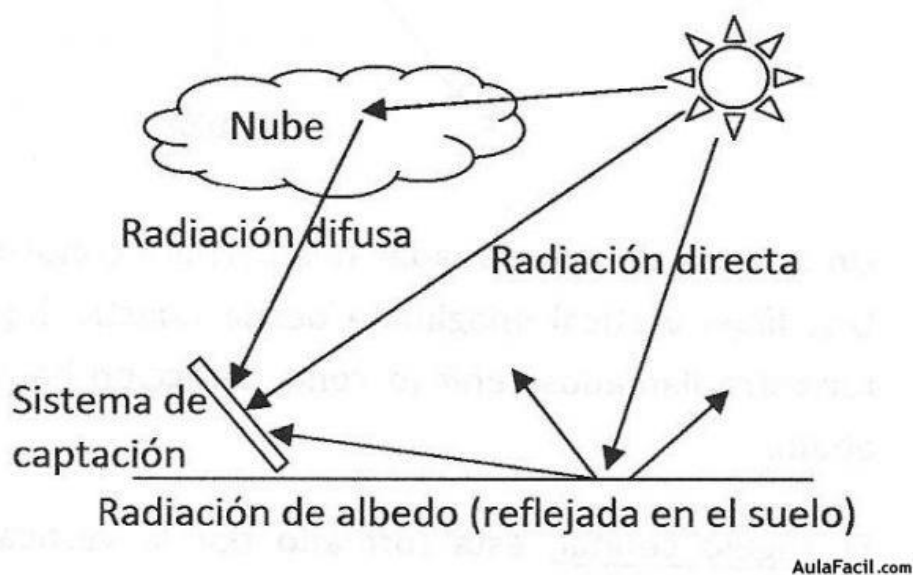


Figura N° 3: Componentes de la radiación solar⁴

La radiación directa es la mayor y la más importante en el diseño de un sistema fotovoltaico. (ver Figura N° 3).

⁴ <http://www.aulafacil.com/cursos/l37815/ciencia/medio-ambiente/energia-solar-termica-1/irradiacion-solar-directa-e-indirecta>

El Perú es uno de los países que cuenta con mayor radiación solar en el mundo, por ello cuenta con un gran potencial de desarrollo en el sector de energía fotovoltaica. Dentro de la región, solo Chile lo supera. Esto se puede observar en la Figura N°4.



Figura N° 4: Mapa de irradiación horizontal en Latinoamérica y el Caribe⁵

⁵ Valdiviezo Salas, Paulo Daniel. «Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica a 15 computadoras portátiles en la PUCP.» Lima, 2014

2.2.1.1. Energía Solar en el Perú⁶

La energía solar es una de las opciones que se están desarrollando como alternativas a las energías provenientes de la quema de combustibles fósiles. A diferencia de los países nórdicos, el territorio peruano, por estar mucho más próximo al Ecuador, cuenta con sol durante la mayor parte del año. Según el Atlas Solar del Perú elaborado por el Ministerio de Energía y Minas, el Perú tiene una elevada radiación solar anual siendo en la sierra de aproximadamente 5,5 a 6,5 kWh/m²; 5,0 a 6,0 kWh/m² en la Costa y en la Selva de aproximadamente 4,5 a 5,0 kWh/m² (ver Figura N° 5).

En el Perú hay tres ámbitos donde se ha desarrollado el uso de energía solar en el Perú. El primer ámbito (y más tradicional) es el uso como fuente térmica a través de termas de agua en zonas del sur peruano, principalmente Arequipa y Puno, departamentos en los que existe cerca de 30 empresas dedicadas a la fabricación y mantenimiento de estos aparatos. No obstante, aún es amplio el camino a recorrer para masificar el uso de paneles solares tanto para áreas urbanas como rurales destinados al uso térmico el cual implicaría menor consumo de la red eléctrica en los hogares (una terma eléctrica es uno de los principales consumidores de energía eléctrica en un hogar). Asimismo, su uso no se limitaría a lo domestico sino también podría incluirse en usos productivos como secadores de granos para la agricultura (en la zona sur la producción de granos

⁶ <http://gruporural.pucp.edu.pe/nota/el-desarrollo-de-la-energia-solar-en-el-peru/>

andinos como kiwicha, quinua, kañihua es alta) así como para como la potabilización de agua en aquellas zonas que lo requieran.

Otro ámbito donde existen avances es en la provisión de electricidad a las zonas rurales. Según datos del 2011, el 16% población peruana no tiene electricidad en sus casas, cifra que se eleva a 22% en las zonas rurales. Según la Dirección General de Electrificación Rural aún existen cerca de 500 000 hogares ubicados en zonas rurales que quedarían sin ser atendidos por los programas públicos de electrificación. El Plan de Electrificación Nacional de Electrificación Rural cerca de 345 823 hogares deberán ser cubiertos con módulos fotovoltaicos en espacios rurales.

Entre los proyectos existentes está el financiado por el Banco Mundial, el Global Environment Facility – GEF y el MEM que ya ha subvencionado la provisión de electricidad a 2 216 hogares que con sistemas fotovoltaicos pilotos. Asimismo, dentro de este esquema existiría en cartera otro subproyecto para llegar a 7 000 hogares más. Otro programa es Euro Solar, que provee 130 pequeñas centrales de energía híbrida (eólico-solar) destinadas a abastecer de energía a postas, colegios y locales comunales rurales. Asimismo, el programa Luz para Todos del Gobierno Central contempla que cerca de 11 640 nuevas localidades con servicio eléctrico serán atendidas con fuentes renovables siendo una buena parte de ellas a través de sistemas fotovoltaicos. Entre las opciones para la electrificación rural están los sistemas fotovoltaico domiciliario (SFD). La empresa estatal ADINELSA, encargada de la promoción de la electrificación rural en

áreas no concesionadas, ya posee más 1500 SFDs operativos en el sur del país.

El tercer ámbito de desarrollo, y el más promisorio, es el que ha surgido con la concesión de las 4 centrales solares que se enlazarán al Sistema Eléctrico Nacional (SEIN) luego de la primera subasta de suministro de electricidad de Recursos Energéticos Renovables (RER) llevada a cabo por el Ministerio de Energía y Minas. Las compañías españolas T-Solar Global y Solarpack Corporación Tecnológica son las que construirán estas cuatro centrales fotovoltaicas, con una potencia conjunta de 80 megavatios (mw). Estas empresas han firmado contratos con el Gobierno Peruano que les permite asegurar la venta de electricidad producida de fuentes solares durante un lapso de 20 años. Según Juan Laso, Director General de T Solar, esta adjudicación le permitirá “incrementar la cartera de proyectos en fase de desarrollo de T-Solar, que suman una potencia superior a los 650 MW”.

Como vemos, el sector de la energía solar va desde pequeñas instalaciones familiares hasta grandes proyectos de centrales solares. Es interesante que los avances, en este último caso, generen el desarrollo tecnológico y la difusión de esta fuente de energía renovable en el país. Una característica primordial de la energía solar es su capacidad para adecuarse a proyectos de mediana y pequeña envergadura para usuarios individuales. Por ejemplo, en ámbitos urbanos se pueden desarrollar instalaciones fotovoltaicas que se integren a grandes superficies expuestas como estacionamientos,



Figura N° 5: Mapa solar del Perú⁷

⁷ (SENAMHI 2003)

edificios, marquesinas. De hecho, la T –Solar ya desarrolla proyectos de este tipo en España. Este tipo de innovaciones permite acercar la producción de electricidad al punto de consumo evitando pérdidas durante el transporte y además de reemplazar el consumo de energía eléctrica de la red nacional y ahorrar costos a quienes la implementan.

No cabe duda de que las opciones de uso de la energía solar son grandes. Lamentablemente, aún existe desconocimiento de aquellos sectores que pueden aprovecharlo más intensamente. Desarrollar este subsector energético sería crucial ya que es una de las mejores opciones para cambiar la actual matriz energética mundial intensiva en gases de efecto invernadero.

2.2.1.2. Horas de sol pico (H.S.P.)

Las horas de sol pico son las horas se definen como el número de horas al día con una irradiancia hipotética de 1000 W/m^2 , que sumen la misma irradiación total que la real ese día.

Se puede notar que cuando la irradiancia se expresa en es numéricamente similar a las H.S.P. Este concepto es importante, ya que junto con un factor de pérdidas ayuda a estimar la potencia producida por los paneles fotovoltaicos. La distribución de la radiación a lo largo del día y el concepto de horas pico de sol se muestran en la siguiente figura N° 6. (Valdiviezo Salas 2014).

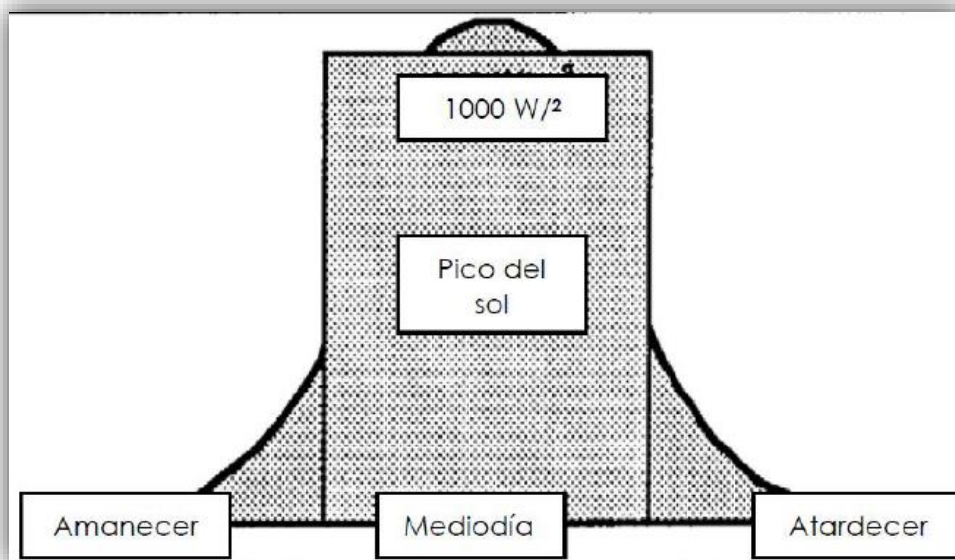


Figura N° 6: Concepto de horas sol pico⁸

2.2.1.3. panel solar o modulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico es la conexión de varias células en paralelo y/o en serie, se conectan en serie para aumentar la corriente y en paralelo para incrementar el voltaje.

Para ensamblar un panel fotovoltaico, se cuentan con plantas que deben estar certificadas con altos estándares de calidad sobre todo en soldadura. Se utilizan principalmente, metales (buenos conductores) y vidrios.

⁸ Valdiviezo Salas, Paulo Daniel. «Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica a 15 computadoras portátiles en la PUCP.» Lima, 2014

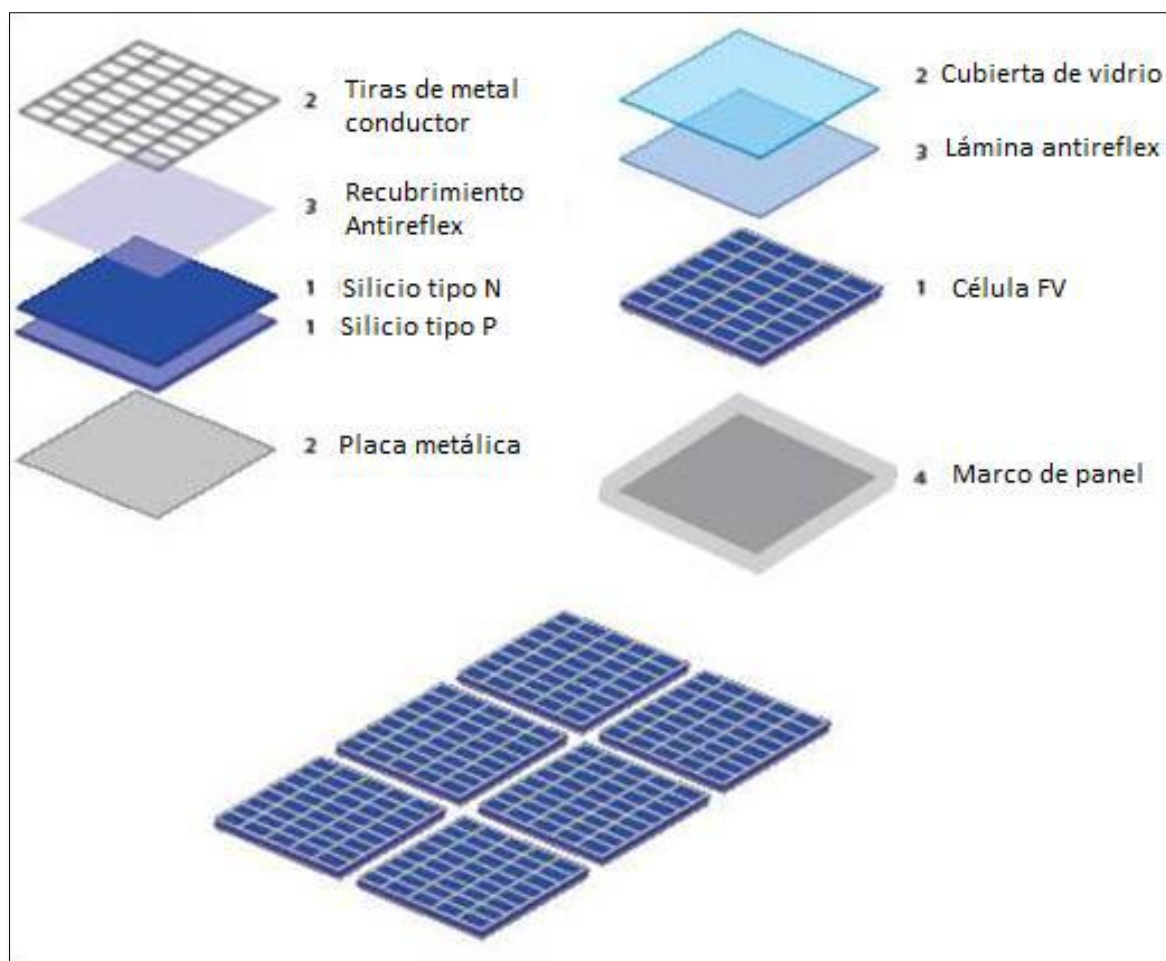
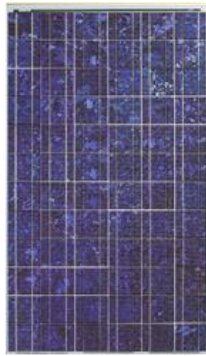


Figura N° 7: Fabricación de la célula y del módulo fotovoltaico⁹

Los tipos de paneles solares vienen dados por la tecnología de fabricación de las células, y son fundamentalmente:

- i. Silicio cristalino (monocristalino y multicristalino).
- ii. Silicio amorfo.

⁹ Valdiviezo Salas, Paulo Daniel. «Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica a 15 computadoras portátiles en la PUCP.» Lima, 2014



Policristalino



Monocristalino



Película Delgada

Figura N° 8: tipos de paneles solares¹⁰

Potencia de la celda solar

La potencia que proporciona una célula de tamaño estándar (digamos de 10 cm) es muy pequeña (en torno a 1 W o 2 W), por lo que generalmente será necesario tener que asociar varias de ellas con el fin de proporcionar la potencia necesaria al sistema fotovoltaico de la instalación. Es de este hecho de donde surge el concepto de *panel solar* o *módulo fotovoltaico*, cuyos elementos y características acabamos de ver.

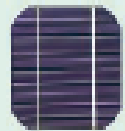

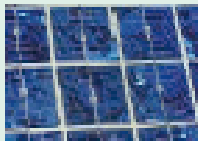
Según la conexión eléctrica que hagamos de las células, nos podemos encontrar con diferentes posibilidades

La conexión en serie de las células permitirá aumentar la tensión final en los extremos de la célula equivalente.

La conexión en paralelo permitirá aumentar la intensidad total del conjunto.

¹⁰ <https://solectricenergiasolar.wordpress.com/2013/11/25/de-que-estan-hechos-los-paneles-solares/>

Tabla N° 1: Diferencias entre los paneles según la tecnología del fabricante

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24 %	15 - 18 %	Son típicos los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralski).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	Policristalino	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	Amorfo	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Fuente: (Díaz Corcobado 2008)

2.2.1.4. Conexiones de módulos fotovoltaicos

La intensidad y la tensión de un módulo fotovoltaico no siempre satisfacen los recursos de tensión e intensidad de un sistema. Es necesario agrupar varios módulos para conseguir valores adecuados, teniendo en cuenta que conectando módulos en serie aumenta la tensión del sistema y conectando módulos en paralelo se aumenta la intensidad de corriente del sistema más características de tensión y de corriente no siempre satisfacen¹¹.

Se pueden realizar tres tipos de conexiones en función de las necesidades que se detallan a continuación:

Conexión serie para elevar la tensión del generador.

Conexión paralela para elevar la intensidad de corriente del generador.

Conexión serie/paralela para elevar la tensión y la intensidad de corriente del generador.

a) Conexión de módulos Serie

Al conectar los paneles en serie, lo que estamos haciendo es conectar un polo positivo de un módulo con el polo negativo del siguiente módulo. Con ello se consigue aumentar la tensión y mantener el mismo valor de corriente generada (Figura N° 8).

La tensión generada es igual a la suma de todas las tensiones por cada módulo fotovoltaico, o lo que es lo mismo al producto de la

¹¹ (Castejon 1998)

tensión de un módulo por el número de módulos fotovoltaicos (ya que se supone que tienen las mismas características).



Figura N° 9: Conexión en serie de módulos fotovoltaicos¹²

b) Conexión de módulos en paralelo

Cuando conectamos los paneles en paralelo, lo que estamos haciendo es conectar todos los polos positivos y por separado todos los polos negativos. Con ello conseguimos aumentar la corriente generada (sumar la intensidad eléctrica de los paneles) y mantener fijo el voltaje, tal como se muestra en la Figura N° 10

La corriente generada es igual a la suma de todas las corrientes generadas por cada módulo, o lo que es lo mismo al producto de la corriente generada por un módulo por el número de módulos (ya que se supone que tienen las mismas características).

¹² <http://www.conermex.com.mx/blog-sombrasenpaneles.html>

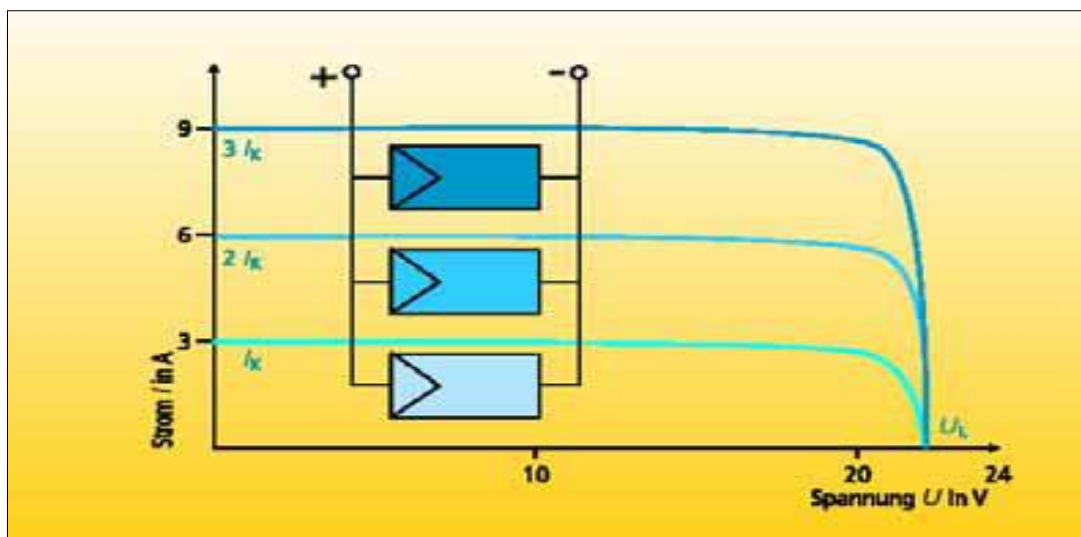


Figura N° 10: Conexión en paralelo de módulos fotovoltaicos¹³

3. Conexión de módulos en serie/paralelo

La tensión del generador es la tensión del módulo se obtiene sumando la tensión de los panees solares en serie y la corriente eléctrica se obtiene sumando la corriente eléctrica de cada rama de paneles.

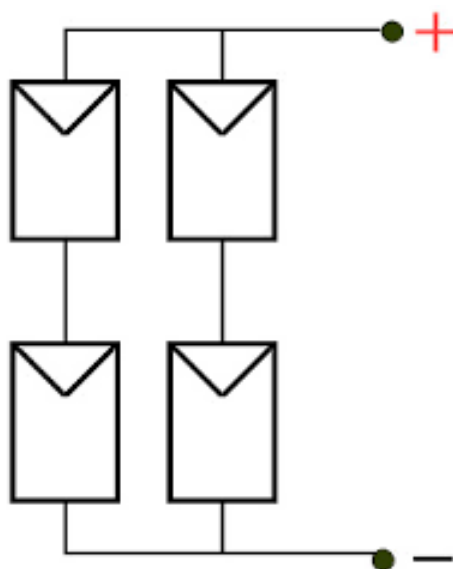


Figura N° 11: Conexión serie/paralelo de módulos fotovoltaicos¹⁴

¹³ FOTOVOLTAICA, ENERGIA. «manual sobre tecnologias, projecto e instalacao .» s.f.

¹⁴ (Agustin Castejon s.f.)

2.2.2. Bombeo solar fotovoltaico

El bombeo de agua con energía fotovoltaica se presenta como una de las aplicaciones más importantes de la energía solar. Es especialmente interesante en zonas rurales en donde los pozos se encuentran en lugares de difícil acceso a la red eléctrica.

El bombeo solar de agua para riego que, aunque en actualmente, resulte excesivamente costoso, es una aplicación que puede presentar en el futuro de un gran potencial de desarrollo. Teniendo en cuenta que las necesidades de agua para riego suelen ir asociadas a las épocas de mayor insolación, coincidiendo oferta y demanda.

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos para riego podrán presentar ventajas económicas frente a otras tecnologías de sistemas de riegos eficientes que permitan el ahorro del agua y energía, como son los sistemas de riego por goteo y se buscará maximizar la utilización de la energía disponible mediante una rotación sistemática de cultivos o cultivos permanentes¹⁵.

Existen dos alternativas de sistemas de bombeos fotovoltaicos que son:

- a) **Bombeo solar directo:** El agua se extrae del pozo durante el tiempo de radiación solar únicamente, almacenándose en un depósito. Se evita los costes asociados a las baterías.

¹⁵ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001.

- b) Bombeo con baterías:** Si las necesidades de extracción de agua son muy precisas o se necesita asegurar el suministro, pueden instalarse baterías para los periodos sin sol.

Los equipos que conforman esta aplicación son:

- i) Módulos fotovoltaicos:** Captan la energía del sol y la convierten en electricidad en corriente continua.
- ii) Acoplamiento módulos-bomba:** Transforma la energía generada por los módulos fotovoltaicos en adecuada para el funcionamiento de la bomba.

2.2.2.1. Funcionamiento del sistema de bombeo solar

Un sistema de bombeo fotovoltaico es similar a los sistemas convencionales excepto por la fuente de potencia como se muestra en la figura N° 12, como sus principales componentes son: un arreglo de módulos fotovoltaico, un controlador, un motor y una bomba y por último un tanque de almacenamiento (Paredes Rubio 2001).

El sistema generador estará constituido por un conjunto de arreglos de módulos fotovoltaicos (paneles solares) conectados en serie o en paralelos, los cuales generarán la energía necesaria para accionar el motor bomba, intermedio a ellos se encontrará un controlador electrónico para la bomba (amplificador de corriente) es un dispositivo (Paredes Rubio 2001)

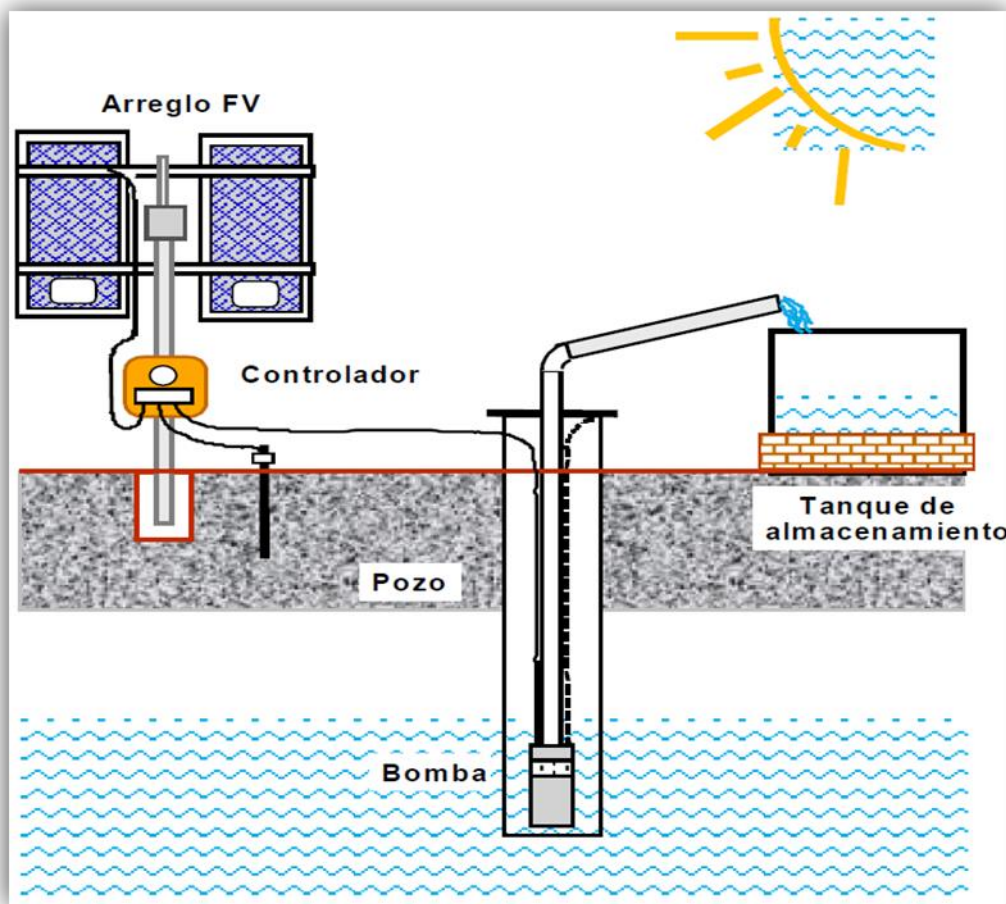


Figura N° 12: Bombeo de agua con energía solar fotovoltaica¹⁶

electrónico que se usa con la mayoría las bombas solares. Este actúa como una transmisión automática, ayudando a la bomba a encender y a no detenerse al disminuir la radiación solar.

Debe tenerse presente que la solución más simple y económica es acumular agua en lugar de energía eléctrica, usando una cisterna. Su incorporación permitirá minimizar el efecto causado por las variaciones estacionales de los recursos hidráulicos o desperfectos temporarios

¹⁶ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

que interrumpan su funcionamiento, almacenar agua en tanques es mucho más económico que almacenar energía en baterías. Después de 5 a 7 años, las baterías necesitan reemplazarse, mientras que la vida útil de un tanque de almacenamiento bien construido es de varias décadas, el almacenamiento por baterías normalmente se justifica solo cuando el rendimiento máximo del pozo durante las horas de sol es insuficiente para satisfacer las necesidades diarias de agua y cuando se requiere bombear agua durante la noche, en general no se recomienda utilizar baterías en los sistemas de bombeos fotovoltaicos, además se recomienda que al almacenar agua se hará para tres días de abasto (Paredes Rubio 2001).

El régimen del funcionamiento del sistema corresponderá con la situación en la que la potencia suministrada por el generador fotovoltaico sea igual a la absorbida por el motor, lo mismo que la tensión y la intensidad proporcionada por el sistema generador serán las aplicadas al motor.

Para diseñar un sistema será necesario conocer el rendimiento del sistema de bombeo que es la relación entre la potencia hidráulica y la potencia eléctrica absorbida.

En los sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua, la energía necesaria para accionar la bomba proviene del sol. La energía solar es captada y transformada en energía eléctrica por medio de los dispositivos llamados celdas solares los cuales son la base de la construcción de los módulos fotovoltaicos.

El sistema generador (paneles solares) deberá elegirse de manera que el punto de trabajo este lo más próximo posible de su punto de máxima potencia ya que son la parte principal del sistema de bombeo fotovoltaico. (Paredes Rubio 2001)

2.2.2.2. Descripción del sistema de bombeo solar

Los principales factores que determinan la configuración de un sistema de bombeo fotovoltaico son:

a. Las condiciones hidráulicas.

La profundidad del nivel del agua en el pozo bajo la superficie.

La altura estática de elevación del agua por encima de la superficie del suelo (por ejemplo, hasta un depósito de almacenamiento).

Las pérdidas adicionales de presión en tuberías y accesorios (altura dinámica).

b. La energía suministrada por el generador fotovoltaico a lo largo del día, determinada por la radiación solar y las condiciones climatológicas.

De acuerdo con estos factores, se pueden definir varias configuraciones de un sistema de bombeo fotovoltaico: sumergible, flotante, con bomba centrífuga o de desplazamiento positivo, con motor de corriente continua o corriente alterna, etc.

Los componentes esenciales en toda instalación son:

Subsistema de generación o generador fotovoltaico.

Subsistema motor-bomba.

Subsistema de acumulación y distribución.

Analicemos los factores que determinan la configuración del sistema¹⁷

2.2.2.3. Condiciones hidráulicas

Antes de determinar el tamaño del sistema de bombeo de agua, es necesario entender los conceptos básicos que describen las condiciones hidráulicas de una obra. El tamaño del sistema está en relación directa con el producto de la Carga Dinámica Total (CDT) y el volumen diario necesario. Este producto se conoce como ciclo hidráulico. La carga dinámica total es la suma de la carga estática (CE) y la carga dinámica (CD). (Paredes Rubio 2001).

$$\begin{aligned} CDT &= CE + CD \\ &= \text{Nivel estatico} + \text{abatimiento} \\ &\quad + \text{altura de descarga} + \text{friccion} \dots (1) \end{aligned}$$

¹⁷ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energia fotovoltaica.» Mexico, 2001

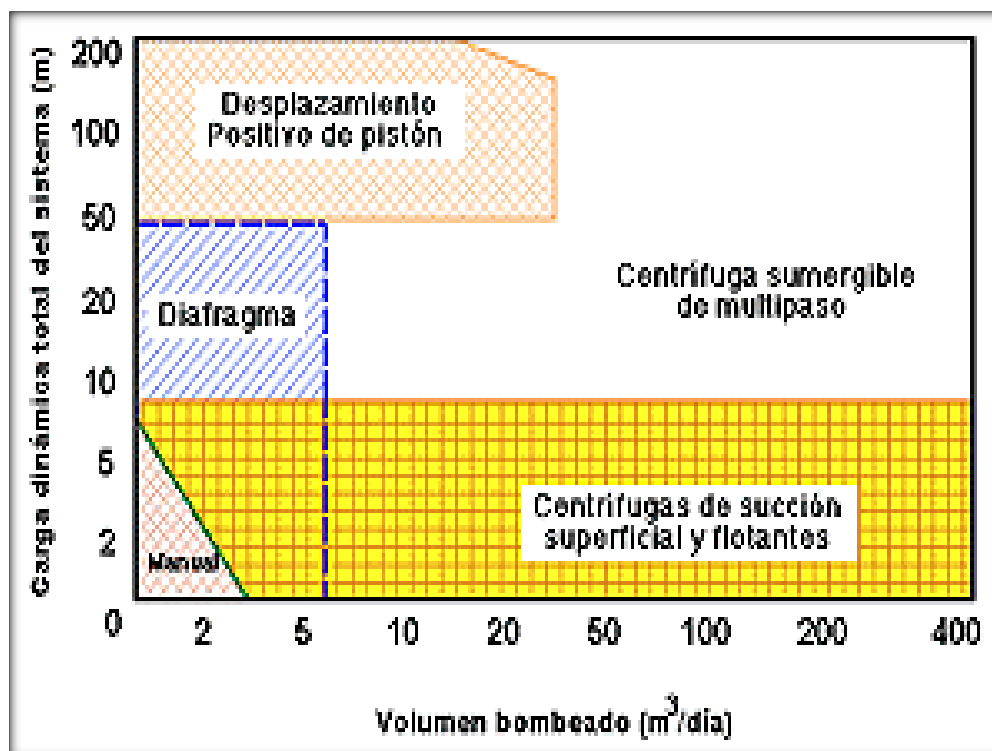


Figura N° 13: Caudal vs carga dinámica del sistema¹⁸

a. Carga estática.

La primera parte, la carga estática, puede obtenerse con mediciones directas. Se trata de la distancia vertical que el agua se desplaza desde el nivel de abatimiento del pozo hasta la altura en que se descarga el agua. La carga estática es entonces la suma del abatimiento, el nivel estático y la altura de descarga. Todos los pozos experimentan el fenómeno de abatimiento cuando se bombea el agua. Es la distancia que baja el nivel del agua debido a la constante extracción de agua. La figura N° 13 muestra estos componentes hidráulicos que forman carga estática. (Paredes Rubio 2001).

¹⁸ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

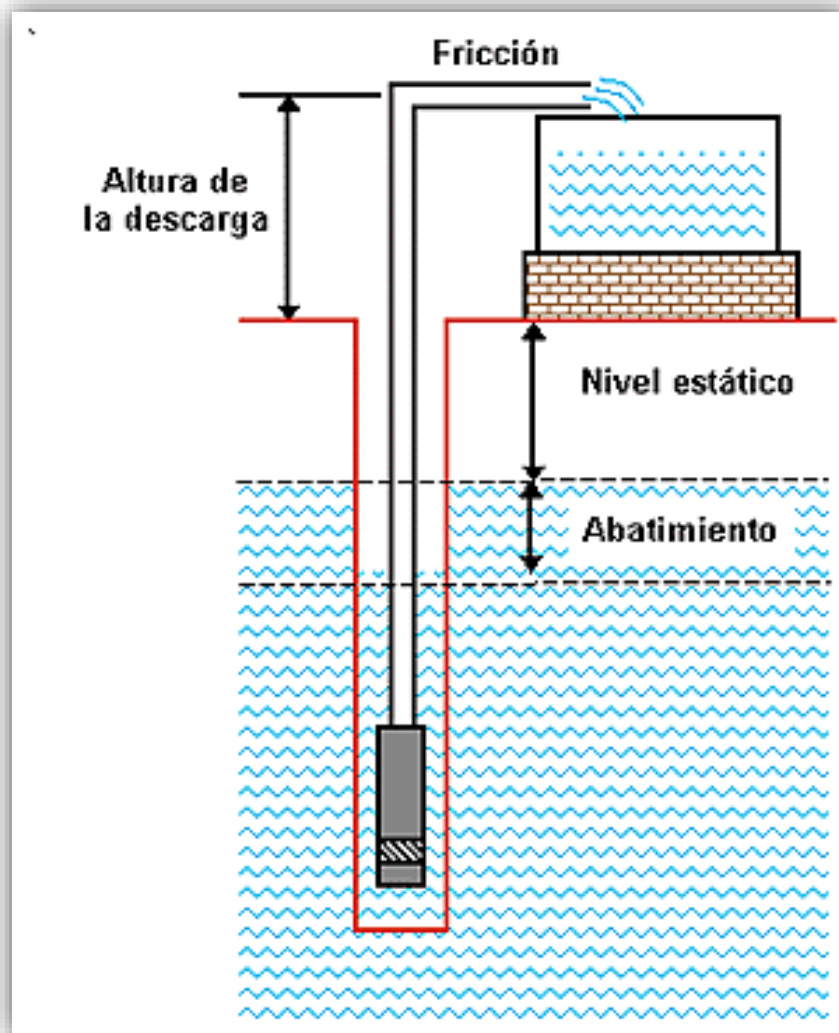


Figura N° 14: Componentes hidráulicos de un sistema de bombeo de agua¹⁹

b. Carga dinámica (Fricción).

La carga dinámica, es el incremento en la presión causado por la resistencia al flujo al agua debido a la rugosidad de las tuberías y componentes como codos y válvulas. Esta rugosidad depende del

¹⁹ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

material usado en la fabricación de las tuberías. Los tubos de acero producen una fricción diferente a la de los tubos de plástico PVC de similar tamaño. Además, el diámetro de los tubos influye en la fricción. Mientras más estrechos mayor resistencia producirá.

Para calcular la carga dinámica, es necesario encontrar la distancia que corre el agua desde el punto en que el agua entra a la bomba hasta el punto de descarga, incluyendo las distancias horizontales, así como el material de la línea de conducción y su diámetro. Con esta información se puede estimar la carga dinámica de varias maneras²⁰.

Valor por omisión

La carga dinámica es aproximadamente el 2 % de la distancia de recorrido del agua. Por lo general el resultado es una estimación conservadora si se asume que los sistemas de bombeo solar típicos tienen flujos de menos de 1 L/s y las bombas recomendadas se conectan a tuberías de diámetro amplio.

Tablas de fricción.

Existen tablas publicadas por fabricantes que indican el porcentaje de fricción que debe añadirse en base al caudal, diámetro y material de las tuberías.

²⁰ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

Formula de Manning.

Este es un método matemático que se puede realizar fácilmente con una calculadora de bolsillo. La fórmula de Manning se expresa así:

$$H_f = KLQ^2 \dots (2)$$

Donde:

H_f: es el incremento en la presión causada por la presión y expresada en la distancia lineal (m).

K: es una constante empírica con unidades de (m³/s)⁻².

L: es la distancia total recorrida por el agua por las tuberías. Su unidad es metros (m).

Q: es el flujo expresado en metros cúbicos por segundo (m³/s).

Tabla N° 2: valores de la constante K usando la fórmula de Maning

Material	Diámetro en pulgadas				
	0.5	0.75	1	1.5	2
PVC	9,544,491	1,261,034	291,815	31,282	7,236
Galvanizado	19,909,642	2,631,046	608,849	65,263	15,097

fuelle: (Paredes Rubio 2001).

Para la determinación de la energía hidráulica es necesario conocer en primer lugar las necesidades de agua, que las referiremos a los valores diarios medios de cada mes. Se puede distinguir entre el consumo continuo, como el abastecimiento de agua potable, tanto para las

personas como para el ganado, consumos estacionales como son los debidos al riego de cultivos.

Las necesidades de agua en las zonas rurales son de aproximadamente 25 a 50 litros por persona. Para el uso agrícola varía según el cultivo y las condiciones climatológicas del lugar. Se estima, en 50 a 300 m³ por hectárea / día.

Para el cálculo de la energía hidráulica diaria mensual se empleará la siguiente expresión:

$$E_h = \gamma x V x h \dots (3)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua (1 000 kg/m³), g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²), V es el volumen del agua necesario diariamente (valor medio del mes en m³/día) y h es la altura manométrica total de elevación.

La altura manométrica h es la suma de la altura estática o geométrica y la altura dinámica debida a las pérdidas de presión cuando el líquido se desplaza en el interior de una tubería.

La altura geométrica o estática es la diferencia de cotas entre el agua en la fuente que puede variar cuando se bombea, y el agua en la salida.

La altura dinámica se puede determinar mediante la siguiente expresión

$$h_p = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \dots (4)$$

Dónde: f es el coeficiente de fricción, L es la longitud de la tubería (m), d el diámetro hidráulico (m), v la velocidad media del fluido (m/s) y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

En el caso que se encuentre en el circuito otro tipo de accesorios como codos, válvulas, etc., se podrá emplear para ellos la siguiente expresión para el cálculo de las pérdidas de cargas en estos accesorios

$$h_s = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \dots (5)$$

Siendo K un coeficiente que depende del tipo de accesorio.

Es frecuente usar tablas en las que se indica las pérdidas de carga en función del caudal y el diámetro de la tubería.

Como el diámetro de tubería aún no se conoce lo normal es fijar la altura dinámica en un 10 % de la altura geométrica, ya que no debe ser mayor, y posteriormente elegir las tuberías y accesorios para que este valor no sea superado.

2.2.2.4. Subsistema de generación

Un generador fotovoltaico consiste en conjunto de módulos, conectados en serie y/o en paralelo, que transforman la energía solar incidente en energía eléctrica.

La corriente de salida de un generador es corriente continua y la potencia eléctrica máxima que puede suministrar depende

fundamentalmente de la irradiancia solar incidente y de la temperatura ambiente.

El generador fotovoltaico se caracteriza mediante su curva $I - V$, que a su vez queda definida mediante los siguientes parámetros:

V_{oc} = Voltaje de circuito abierto.

I_{sc} = Corriente de corto circuito.

P_{max} = Potencia máxima, ($P_{max} = V_{max} * I_{max}$).

El generador puede trabajar en cualquier punto de la curva $I - V$ suministrando una potencia distinta para idénticas condiciones de irradiancia y temperatura, impuesta por el tipo de carga eléctrica de salida.

El comportamiento de los módulos fotovoltaicos está definido por dos parámetros fundamentales: la radiación que tiene una relación lineal con la corriente generada (potencia generada), como ejemplo observaremos el siguiente modulo en donde se mostrará las curvas características del panel solar, así como sus datos técnicos que

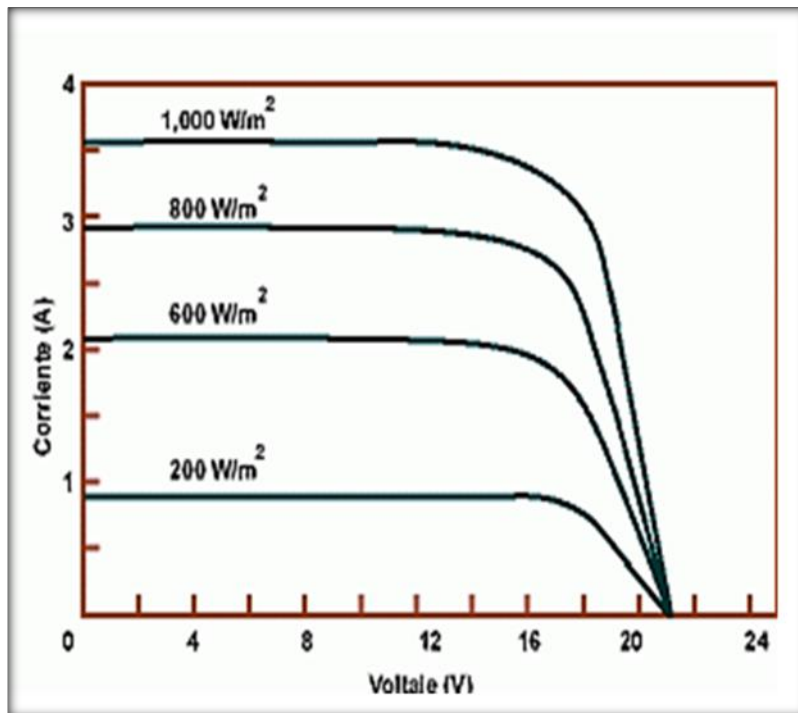


Figura N° 15: Relación voltaje- corriente para cierto valor de irradiación solar²¹

proporciona en fabricante a las condiciones de trabajos respectivas:

Para dimensionar el generador fotovoltaico consiste en determinar la potencia pico que se necesita instalar para satisfacer los consumos a lo largo de todo el año. El cálculo se hace para el mes crítico, utilizando valores medios mensuales.

La energía eléctrica que se necesita suministrar diariamente al sistema motor bomba, será el cociente entre la energía hidráulica requerida y el rendimiento diario medio mensual del grupo motor – bomba, η_{mb} , al que le podemos asignar un valor entre 0,3 y 0,4:

²¹ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

$$E_e = \frac{E_h}{n_{mb}} \dots (6)$$

2.2.2.5. Subsistema Motor- Bomba

Para el subsistema motor – bomba lo detallaremos en dos partes:

Motores.

Bombas.

a. Motores.

Los motores son los encargados de transformar la energía eléctrica suministrada por el sistema generador en energía mecánica. Los motores que se precisan en aplicaciones de bombeo fotovoltaico deben ser de pequeña potencia y deben tener rendimientos elevados. Este tipo de motores no son habituales por lo que pueden ser más costosos. Dependiendo del tipo de alimentación eléctrica los motores podemos distinguir entre motores de corriente continua y motores de corriente alterna. Dentro de los motores de corriente continua podemos distinguir entre motores de imanes permanentes con escobillas y sin escobillas, motores serie, motor Shunt o motores compound. Dentro de los motores de corriente alterna podemos distinguir entre motores monofásicos y motores trifásicos en función del tipo de corriente para el que estén diseñados y, por otro lado, también pueden ser motores síncronos o motores asíncronos. (Paredes Rubio 2001)

Las partes fundamentales de un motor de corriente continua son el inductor o estator que es la parte fija de la máquina, el inducido o rotor que es la parte giratoria, el colector que va montado sobre el mismo eje que el rotor y giran simultáneamente, las escobillas que son unos contactos a presión que rozan sobre el colector y tienen como misión la entrada y salida de la corriente del rotor.

Los motores de corriente continua se caracterizan por su voltaje, potencia y velocidad nominal y por el par 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 el flujo magnético.

Las principales ventajas de los motores de corriente continua son sus altos rendimientos, el no necesitar un inversor y se adaptan bien para su acoplamiento directo al generador fotovoltaico.

Los motores de corriente alterna están más extendidos siendo más fácil de encontrarlos en potencias mayores. Son más baratos y eficientes que los de corriente continua, pero obligan a la instalación de un sistema inversor y a dispositivos que permitan proporcionar o reducir las altas corrientes que suelen requerir. Arranque lo que encarece el sistema fotovoltaico. (Paredes Rubio 2001)

Los motores de corriente alterna constan igualmente de dos partes de rotor y estator. En el inducido, que suele estar en el estator, las

corrientes alternas que lo recorren producen un campo magnético giratorio como consecuencia de la superposición de tres campos magnéticos alternantes desfasados en el espacio y el tiempo o por descomposición de un campo magnético alternante senoidal en dos campos magnéticos giratorios en sentidos contrarios.

Los motores de corriente alterna se caracterizan generalmente por sus tensiones nominales, la intensidad nominal, la potencia nominal, por su velocidad de giro en función de la frecuencia de alimentación, y por su par motor.

b. Bombas.

Una bomba es la máquina que transforma la energía mecánica en energía hidráulica. Se puede distinguir dos tipos principales de bombas: bombas de desplazamiento positivo o volumétricas y bombas dinámicas o de intercambio de cantidad de movimiento.

Las bombas de desplazamiento positivo poseen una cavidad cuyo volumen varía como consecuencia del movimiento de una parte móvil, obligando al líquido que las llena a moverse en un sentido determinado por la apertura y cierre de válvulas. La más usada en bombeo fotovoltaico de este tipo bombas es la bomba de pistón. Las bombas de pistón son apropiadas para los valores elevados de altura manométrica y bajos caudales. (Paredes Rubio 2001)

Las bombas dinámicas le transfieren al fluido una cantidad de movimiento mediante paletas o alabes giratorios. La más utilizada es la bomba centrífuga. Las bombas centrífugas se diseñan para alturas

manométricas determinadas y proporcional más caudal que las bombas de desplazamiento positivo. No son recomendables para alturas de aspiración mayores de 5 -6 metros y pueden tener uno o varios cuerpos dependiendo de la altura de impulsión necesaria.

Para caracterizar las bombas se utilizan curvas características que relacionan el caudal con la altura manométrica que pueden suministrar para un régimen de revoluciones determinado. Además, el rendimiento de las bombas centrifugas disminuye rápidamente con la velocidad de giro, las bombas centrifugas reúnen una serie de ventajas entre las que destacamos su simplicidad, con pocas partes móviles, su bajo costo, su robustez y la tolerancia a los pequeños pares de arranque. (Paredes Rubio 2001)

También podemos clasificar las bombas en función de su forma de instalación en sumergibles, flotantes y de superficie. Las bombas sumergibles son apropiadas para los pozos de poco diámetro donde las variaciones de nivel son importantes para la acumulación de agua se hace en altura. Las bombas flotantes se instalan en ríos, lagos o pozos de gran diámetro permitiendo una altura de aspiración constante y proporcionando un gran caudal con poca altura manométrica. Las de superficie se instalan en aquellos lugares en los que los niveles de agua de aspiración no sufre grandes oscilaciones, permitiendo la altura de aspiración dentro de un rango admitido por la bomba, generalmente < 6 m. en algunos casos las bombas son auto aspirantes como las utilizadas en piscinas que no requieren cebado

de la tubería de aspiración (generalmente, $h_{\text{aspiración}} < 3\text{m}$) (Paredes Rubio 2001).

2.2.2.6. Equipo de bombeo compatible con sistemas fotovoltaicos.

Las bombas comunes disponibles en el mercado han sido desarrolladas pensando en que hay una fuente de potencia constante. Por otro lado, la potencia que producen los módulos FV es directamente proporcional a la disponibilidad de la radiación solar. Es decir, a medida que el sol cambia su posición durante el día y al variar la disponibilidad de potencia también cambia la disponibilidad de potencia de la bomba. Por esta razón se han creado bombas especiales para la electricidad fotovoltaica las cuales se dividen desde el punto de vista mecánico en **centrífugas y volumétricas**²².

a). Bombas centrífugas²³.

Tienen un impulsor que por medio de la fuerza centrífuga de su alta velocidad arrastran agua por su eje y la expulsan radialmente. Estas bombas pueden ser sumergibles o de superficie son capaces de bombear el agua a 60 metros o más, dependiendo del número y tipo de impulsores. Están optimizadas para un rango

²² (Paredes Rubio 2001)

²³ (Paredes Rubio 2001)

estrecho de cargas dinámicas totales y la salida de agua se incrementa con su velocidad rotacional.

Las bombas de succión superficial se instalan a nivel del suelo y tienen ventaja de que se les puede inspeccionar y dar servicio fácilmente. Tienen la limitante de que no trabajan adecuadamente si la profundidad de succión excede los 8 metros. (ver figura N° 16).

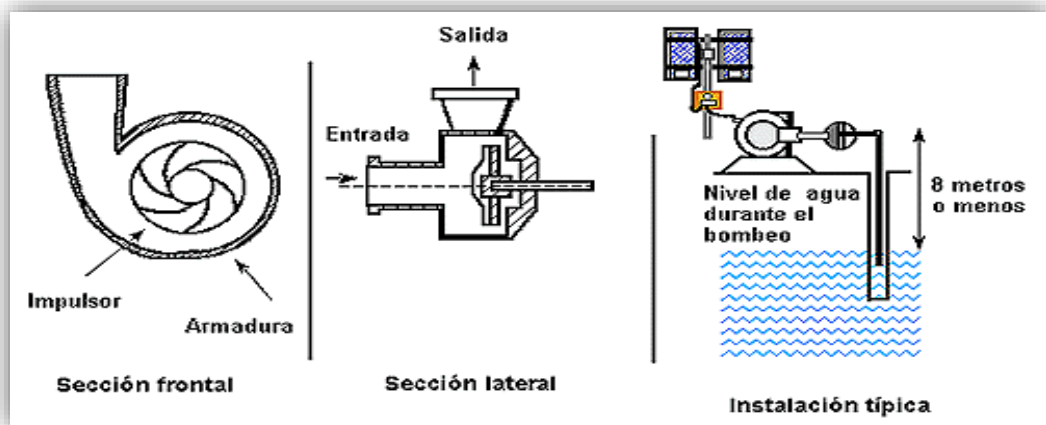


Figura N° 16: Bombas centrífugas de succión superficial²⁴

²⁴ (Paredes Rubio 2001)



Figura N° 17: Bomba centrífuga superficial²⁵

Hay una gran variedad de bombas centrífugas sumergibles. Algunas de estas bombas tienen el motor acoplado directamente a los impulsores y se sumergen completamente. Otras, tienen el motor en la superficie mientras que los impulsores se encuentran completamente sumergidos y unidos por una flecha. Generalmente las bombas centrífugas sumergibles tienen varios impulsores y por ello, se les conoce como bombas de paso múltiple. (Paredes Rubio 2001).

²⁵ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

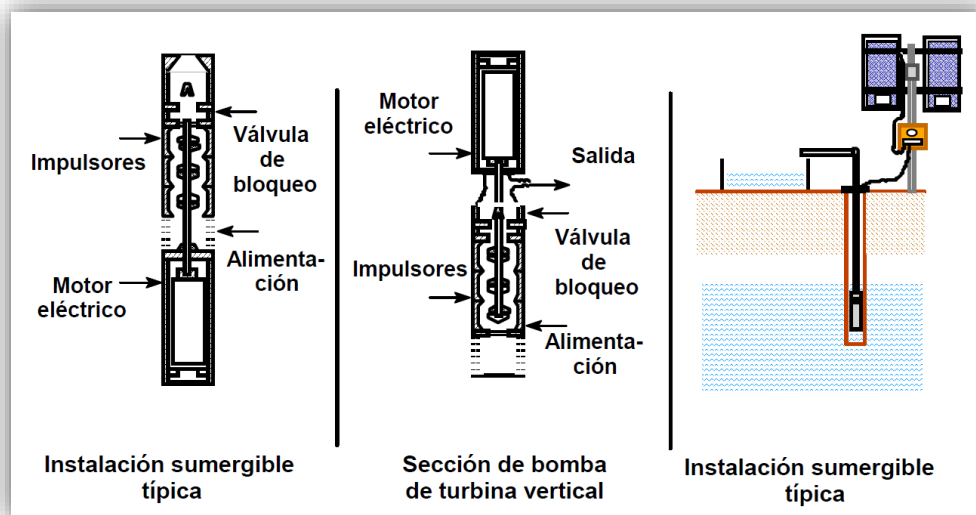


Figura N° 18: Bomba centrífuga sumergible²⁶

Todas las bombas sumergibles están selladas y tienen el aceite de lubricación contenido para evitar contaminación del agua. Otras bombas utilizan el agua misma como lubricante. Estas bombas no deben operarse en seco por que sufren sobrecalentamiento. (Paredes Rubio 2001).

b) Bombas volumétricas.

Las bombas volumétricas o de desplazamiento positivo son adecuadas para el bombeo de bajos caudales y/o donde la profundidad es grande. Algunas de estas bombas usan un cilindro y un pistón para mover paquetes de agua a través de una cámara sellada. Otras utilizan un pistón con diafragmas. Cada ciclo mueve una pequeña cantidad de líquido hacia arriba. El caudal es

²⁶ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

proporcional al volumen de agua. Esto se traduce a un funcionamiento eficiente en un amplio intervalo de cargas dinámicas. Cuando la radiación solar aumenta también aumenta la velocidad del motor y por lo tanto el flujo de agua bombea es mayor, ver figura N° 19.

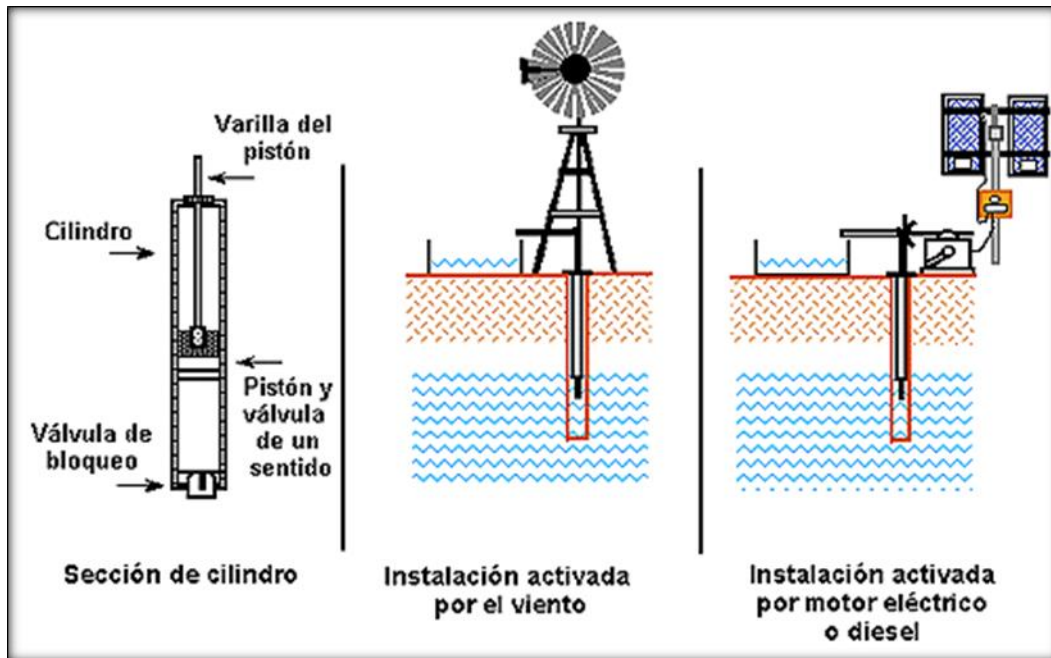


Figura N° 19: Bomba volumétrica de cilindro²⁷

c) Bombas de cilindro:

Las bombas de cilindro han sido muy populares en aplicaciones de bombeo mecánico activadas por el viento, tracción animal o humana. Su principio consiste en que cada vez que el pistón baja, el agua del pozo entra a su cavidad y cuando este sube, empuja el agua a la superficie. La energía eléctrica requerida para hacerla funcionar se aplica solo durante una parte del ciclo de bombeo. Las bombas de

²⁷ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

esta categoría deben estar siempre conectadas a un controlador de corriente para aprovechar al máximo la potencia otorgada por el arreglo fotovoltaico. (Paredes Rubio 2001).

d) Bombas de diafragma:

Las bombas de diafragma desplazan el agua por medio de diafragmas de un material flexible y resistente. Comúnmente los diafragmas se fabrican de caucho reforzado con materiales sintéticos. En la actualidad, estos materiales son muy resistentes y pueden durar de dos a tres años de funcionamiento continuo antes de requerir reemplazo dependiendo de la calidad del agua. Los fabricantes de estas bombas producen un juego de diafragmas para reemplazo que pueden adquirirse a un precio razonable. Existen modelos sumergibles y no sumergibles. (Ver figura N° 20).

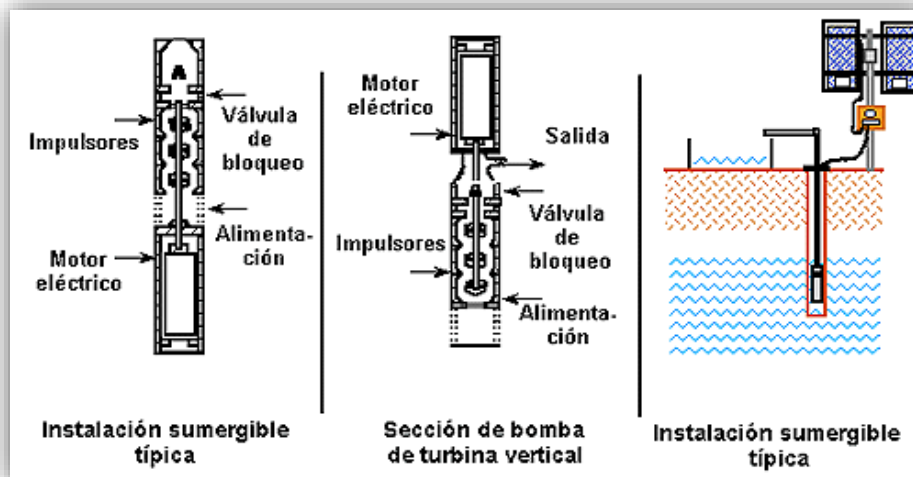


Figura N° 20: Bomba de diafragma sumergible²⁸

Las bombas de diafragma son económicas. Cuando se instala una bomba de este tipo siempre se debe considerar el gasto que representa el reemplazo de diafragmas una vez cada dos o tres años. Más aun, muchas de estas bombas tienen un motor de corriente continua con escobillas. Las escobillas también deben cambiarse periódicamente. Los juegos de reemplazo incluyen los diafragmas, escobillas, empaques y sellos. La vida útil de este tipo de bomba es aproximadamente 5 años del uso. (Paredes Rubio 2001).

2.2.2.7. Selección de la bomba

Las bombas centrífugas y volumétricas ofrecen diferentes alternativas para diferentes rangos de aplicación. El proceso de selección de la bomba para un proyecto es de suma importancia.

²⁸ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001

Todas las bombas tienen que usar la energía eficientemente ya que, en un sistema fotovoltaico, la energía cuesta dinero. Este proceso de selección de la bomba se complica debido a la multitud de marcas y características de una bomba. Un solo fabricante puede ofrecer más de 20 modelos de bombas y cada una tiene un rango óptimo de operación.

Las bombas más eficientes son el desplazamiento positivo de pistón, pero no son recomendables para los gastos medianos y grandes a baja carga dinámica total.

En el diagrama siguiente indica el tipo de bomba adecuada que se recomienda en general según la carga dinámica total del sistema de bombeo. (Paredes Rubio 2001).

Tabla N° 3: Principales características de las bombas fotovoltaicas

Bombas Fotovoltaicas	Características y Ventajas	Desventajas
Centrífugas sumergibles	Comúnmente disponibles. Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena. Pueden utilizar el agua como lubricante. Cuentan con motores de CC de velocidad variable o CA. Manejan flujos altos. Operan a cargas dinámicas grandes. Tienen un diseño modular que permite obtener más agua al agregar más módulos fotovoltaicos.	Tienen un rango de eficiencia estrecho con respecto a la CDT. Se dañan si trabajan en seco. Deben extraerse para darles mantenimiento. Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas.
Centrífugas de succión superficial	Comúnmente disponibles. Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena. Son de fácil operación y mantenimiento por ser superficiales. Cuentan con motores de CC de velocidad variable o CA. Manejan flujos altos. Manejan cargas dinámicas altas, aunque no son capaces de succionar más de 8 metros.	Tienen un rango de eficiencia estrecho con respecto a la CDT. Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas. Pueden dañarse por el congelamiento en climas fríos.
Desplaza- miento positivo de pistón	Soportan cargas dinámicas muy grandes. La producción puede variarse ajustando la carrera del pistón.	Requieren de reemplazo regular de sellos del pistón. No toleran arenas o sedimentos. La eficiencia se reduce a medida que el pistón pierde la capacidad de sellar el cilindro. Debe extraerse el pistón y el cilindro del pozo para reparar los sellos. No dan grandes flujos.
Diafragma	Operan a cargas menores de 40 metros. Son muy económicas.	No toleran arenas o sedimentos. No trabajan a cargas dinámicas grandes Bajos flujos.

fuelle: (Paredes Rubio 2001).

2.2.2.8. Subsistema de acumulación y distribución.

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos sin almacenamiento no proveen agua cuando el sol brilla. Las necesidades de agua para consumo requieren del uso de un tanque de almacenamiento. Se recomienda almacenar el agua para tres días de abasto. (Paredes Rubio 2001).

Almacenar agua en tanques es mucho más económico que almacenar energía en baterías. Después de cinco a siete años, las baterías necesitan reemplazarse, mientras que la vida útil de un tanque de almacenamiento bien construido es de varias décadas. El almacenamiento por baterías normalmente se justifica solo cuando el rendimiento máximo del pozo durante las horas de sol es insuficiente para satisfacer las necesidades diarias de agua y cuando se requiere bombear agua durante la noche. La introducción de baterías en un sistema de bombeo fotovoltaico podría reducir la confiabilidad del sistema e incrementar sus requerimientos de mantenimiento. En general no se recomienda utilizar baterías en sistemas de bombeo fotovoltaico. (Paredes Rubio 2001)

Los depósitos de almacenamiento permiten mantener cierta autonomía, para lo que deberán dimensionarse en función de los consumos que realicen fuera de las horas de sol, por ello suelen ser aconsejables sistemas de almacenamiento a corto plazo que permiten una reducción de la potencia del sistema de bombeo. El almacenamiento a largo plazo con la finalidad del riego agrícola

exige grandes depósitos que serían costosos a no ser que ya esté disponible anteriormente. En el diseño se tendrá en cuenta las variaciones en la altura manométrica que el llenado de los depósitos pueda ocasionar en el bombeo o en la distribución posterior. Estos depósitos tendrán la resistencia adecuada para soportar el empuje del líquido, y si se quieren eliminar las pérdidas por evaporación y la entrada de suciedad deberán estar cubiertos.

Los elementos de aplicación o de distribución del agua de riego más apropiados para los riegos fotovoltaicos son los goteros por las bajas alturas manométricas que requieren para su funcionamiento y el uso eficiente del agua que se consiguen.

Los sistemas de riego por goteo son altamente eficientes en la utilización de agua, requiriendo menor cantidad que cualquier otro sistema de riego agrícola.

Son versátiles pueden ser utilizados tanto en la producción agrícola doméstica, como en viveros forestales, ornamentales o de bien en producción agrícola comercial a baja escala.

Requieren de baja presión, funcionan con baja presión de agua o solo con la fuerza de gravedad, por eso no requieren de bombas de presión o equipos complejos.

Son sistemas funcionales son de fácil instalación, uso y mantenimiento, y pueden ser instalados temporal o permanentemente en las áreas de producción. Su apropiada

utilización y mantenimiento brinda una garantía entre cinco a siete años de vida útil²⁹

2.2.2.9. Controladores

Los controles electrónicos pueden mejorar el rendimiento de un sistema de bombeo solar, bien diseñado, del 10 al 15 %. 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).³⁰

2.3. Definición conceptual de la terminología empleada³¹.

Radiación solar

Energía procedente del sol en forma de ondas electromagnéticas.

Irradiancia

Densidad de potencia incidente en una superficie o a energía incidente en una superficie por unidad de tiempo y unidad de superficie. Se mide en kW/m²

²⁹ (Paredes Rubio 2001)

³⁰ (Díaz Corcobado 2008)

³¹ (Ixtebe Portabelle 2010)

Irradiación

Energía incidente por unidad de superficie y a lo largo de un cierto periodo de tiempo. Se mide en kWh/m².

Instalación fotovoltaica

Aquella que se disponen de módulos fotovoltaicos para la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica sin ningún paso intermedio.

Instalaciones fotovoltaicas interconectadas

Aquellas que normalmente trabajan en paralelo con la empresa concesionaria de energía eléctrica.

Generador fotovoltaico

Asociación en paralelo de ramas series fotovoltaicas.

Rama o serie fotovoltaica

Subconjunto de módulos conectados en serie o asociaciones serie paralelo con voltaje igual a la tensión nominal del generador.

Potencia nominal del generador

Suma de las potencias máximas de los módulos fotovoltaicos.

Potencia instalada fotovoltaica o potencia nominal

Suma de potencia nominal de los inversores (la especificada por el fabricante) que intervienen en las tres fases de la instalación en condiciones nominales de funcionamiento.

Célula solar o fotovoltaica

Dispositivo que transforma la radiación solar en energía eléctrica.

Modulo o panel fotovoltaico

Conjunto de células solares directamente interconectadas y encapsuladas como único bloque, entre materiales que las protegen de los efectos de la intemperie.

Arreglo solar: Conjunto de módulos solares fotovoltaicos conectados eléctricamente e instalados.

Caja de conexión: Caja a donde se llevan los cables para realizar las conexiones.

Carga: Cualquier dispositivo o aparato que demanda potencia. Esta depende de cada aparato y varía durante el día de acuerdo a la manera en que ésta opera.

Condiciones de prueba estándar: Condiciones en las cuales se prueban los módulos fotovoltaicos en laboratorio (1 kWh/m² de radiación solar, 25°C de temperatura de la celda solar y espectro solar correspondiente a una masa de aire de 1,5).

Conexión en paralelo: Método de conexión en el cual todos los bornes positivos y negativos se juntan. Si los módulos son todos iguales, la corriente se suma y la tensión permanece igual.

Conexión en serie: Método de conexión en el cual el borne positivo de un módulo se conecta al borne negativo del siguiente y así sucesivamente. Si los módulos son todos iguales, el voltaje se suma y la corriente permanece igual.

Conductor eléctrico: Todo material capaz de conducir la corriente eléctrica. Para transportar la energía eléctrica se utilizan “hilos” fabricados generalmente de cobre o aluminio.

Consumo eléctrico: Número de Watts hora (Wh) o Kilowatts hora (kWh) utilizados para que funcione un aparato eléctrico durante un tiempo. Depende de la potencia del aparato y del tiempo que esté funcionando.

Constante solar: Cantidad de energía solar que incide sobre una superficie de 1 m^2 por segundo, cuando ésta se halla en el tope de la atmósfera a la distancia media sol-tierra. Su valor es aproximadamente $1,36 \text{ kW/m}^2$.

Corriente continua: La corriente continua (CC o DC, en inglés) se genera a partir de un flujo continuo de electrones (cargas negativas) siempre en el mismo sentido, el cual va desde el polo negativo de la fuente al polo positivo. Al desplazarse en este sentido los electrones, los huecos o ausencias de electrones (cargas positivas) lo hacen en sentido contrario, es decir, desde el polo positivo al negativo.

Corriente de corto circuito: Corriente que se mide en condiciones de corto circuito en los terminales de un módulo.

Corriente de máxima potencia: Corriente correspondiente al punto de máxima potencia.

Cortocircuito: Conexión accidental de dos conductores de distinta fase, o de éstos con el neutro.

Curva I-V: Característica Intensidad vs. Voltaje tomada bajo condiciones determinadas de radiación. Es la información esencial para caracterizar a los módulos fotovoltaicos.

Diodo de bloqueo: Dispositivo conectado en serie entre el módulo y la batería para prevenir el flujo de electricidad de la batería hacia los módulos.

Diodo de bypass: Dispositivo conectado en paralelo a los módulos para desviar el flujo a través suyo cuando sobre el módulo hay sombras o falla alguna celda.

Eficiencia de la celda: Relación entre la potencia que entrega una celda solar (expuesta a pleno sol) a la potencia solar incidente sobre ella.

Horas de sol pico: Número equivalente de horas a 1 kWh/m^2 de radiación solar que produce la misma cantidad de energía solar que bajo las condiciones reales de insolación.

Instalación eléctrica: Conjunto de aparatos y de circuitos asociados, en previsión de un fin particular: producción, conversión, transformación, transmisión, distribución o utilización de la energía eléctrica.

Intensidad eléctrica: Magnitud eléctrica definida como la cantidad de electricidad que pasa a través de la sección de un cable conductor en un segundo. Se mide en Amperios (A)

Interruptor: Aparato utilizado para conectar o desconectar parte de una instalación.

Kilowatt: Mil watts ($1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$)

Masa de aire: Medida de la distancia que atraviesa la luz en la atmósfera en su trayectoria hacia la superficie terrestre.

Megawatt: Un millón de watts ($1 \text{ MW} = 1\,000\,000 \text{ W}$)

Módulo o módulo solar fotovoltaico: Conjunto de celdas solares interconectadas dentro de una unidad sellada.

NOCT (Nominal Operation Cell Temperature): Es la temperatura que alcanza la celda cuando ésta se expone a 800 W/m^2 de radiación en un ambiente con aire a 20°C de temperatura y circulando a una velocidad de 1 m/s , cuando la celda está en circuito abierto.

Potencia eléctrica: Capacidad de los aparatos eléctricos para producir trabajo (la cantidad de trabajo realizado en la unidad de tiempo). La unidad de medida es el Watt (W), el kilowatt (kW) o el megawatt (MW).

Punto de máxima potencia: Punto de la curva I-V en donde el producto $I * V$ (potencia) tiene su valor máximo.

Tensión eléctrica: Diferencia de potencial eléctrico que tiene que existir entre los bornes de conexión o entre dos partes activas de una instalación, para que la corriente eléctrica circule por dicha instalación. La unidad de medida es el Voltio (V)

Voltaje de circuito abierto: Voltaje que se mide en los terminales sin carga de un sistema fotovoltaico.

Voltaje de máxima potencia: Voltaje correspondiente al punto de máxima potencia.

Watt pico: Unidad de medida de un módulo solar fotovoltaico, que significa la cantidad de potencia máxima que puede generar el módulo a condiciones estándar de funcionamiento (1000 W/m², 25°C y 1,5 de masa de aire).

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación es aplicativo puesto que los resultados del dimensionamiento del bombeo fotovoltaico se van a utilizar para solucionar un problema que está aconteciendo en el caserío Chillvaca, ubicado en el Distrito de Incahuasi, provincia de Cutervo en la región Lambayeque

El diseño de la investigación es descriptivo, ya que en esta etapa se utilizaron técnicas describir la situación en base a la recolección de datos de campo, además de otros datos como la radiación solar que lo vamos a obtener de internet.

3.2. Población y muestra

La población es el caserío Chillvaca ubicado en el Distrito de Incahuasi provincia de Ferreñafe en la región Lambayeque.

3.3. Hipótesis

Si se aprovecha la energía solar fotovoltaica entonces con el dimensionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico se logrará suministrar de agua al caserío Chillvaca ubicado en el Distrito de Incahuasi provincia de Ferreñafe en la región Lambayeque.

3.4. Variables - Operacionalización

Tabla N° 4: Operacionalización de variables

<i>VARIABLES</i>	<i>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</i>	<i>DEFINICIÓN OPERACIONAL</i>	<i>INDICADORES</i>
Sistema de bombeo de agua	El proceso de bombeo de agua implica elevar un determinado volumen de agua desde un nivel por debajo de la superficie hasta la boca del pozo. Este procedimiento se hace a mano o con la ayuda de animales, que permitió por centurias la extracción de agua de un pozo	Selección y especificación del equipo, determinación de la capacidad instalada.	Caudal diario requerido. Dimensionamiento de la bomba sumergible Dimensionar el regulador Dimensionamiento el tanque de almacenamiento.
Energía solar fotovoltaica	La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, ¹ obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica ³²	Cantidad de agua demandada por el caserío	Irradiación solar promedio Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Fuente. Elaboración propia

³² https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica

3.5. Métodos y Técnicas de investigación

Métodos

En este examen de suficiencia profesional utilizamos el método deductivo a partir de las teorías, leyes y normas emitidas por el Ministerio de Energía y Minas las aplicamos para calcular, seleccionar los equipos. Las técnicas principales empleadas fueron las siguientes:

Técnicas

Observación

Este tipo de técnica nos permitirá realizar una inspección visual de la situación actual en lo referente a la cantidad de agua para personas, ganado vacuno, aves de corral, etc. esta información es muy importante para realizar la propuesta de acuerdo al estudio realizado.

Análisis de documentos

Para desarrollar esta técnica buscaremos la información en libros actualizados con relación al tema de investigación, también analizar los diferentes trabajos realizados en revistas, manuales, fichas técnicas, publicaciones en distintas páginas confiables de internet.

3.6. Descripción de los instrumentos utilizados

Entrevista:

Por medio de conversaciones con los habitantes del caserío de por medio de un cuestionario de preguntas preparadas, se ha aprovechado para recopilar datos.

Lista Check

Empleada para hacer verificaciones de los datos de campo.

Resumen

Este instrumento se utilizó para rescatar la información de diferentes fuentes sobre el tema.

Fotografías

Se utilizaron las fotografías para evidenciar nuestra presencia con los habitantes del caserío.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Propuesta de la investigación

En este examen de suficiencia se propone la implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico para el caserío Chillvaca en el distrito de Incahuasi en Ferreñafe perteneciente a la región Lambayeque.

4.1.1. Equipamiento de la propuesta

En lo que respecta al equipamiento se ha considerado:

08 módulos fotovoltaicos SIMAX de 190 Wp; 2 ramas de dos módulos fotovoltaicos conectados en paralelo

01 controlador.

Proponemos usar una bomba sumergible **LORENTZ PS2- 1800 C-SJ3-18**, la capacidad de este sistema será de 4,0 m³/h y una altura dinámica total de 80 m.

CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Tomando en consideración las necesidades de la implementación del sistema bombeo con suministro de energía eléctrica fotovoltaica en el caserío Chillvaca en Ferreñafe.

5.1. Evaluación de la energía solar disponible

Para determinar la radiación solar el cual lo utilizaremos en nuestro cálculo se ha considerado tres fuentes

a) Radiación solar según la página web de la NASA

Del ítem 1.4 se ha obtenido que la ubicación del caserío es:

Latitud: -6. 1216900000

Longitud: -79. 3321400000

Tabla N° 5: Radiación solar en el caserío Chillvaca-Incahuasi

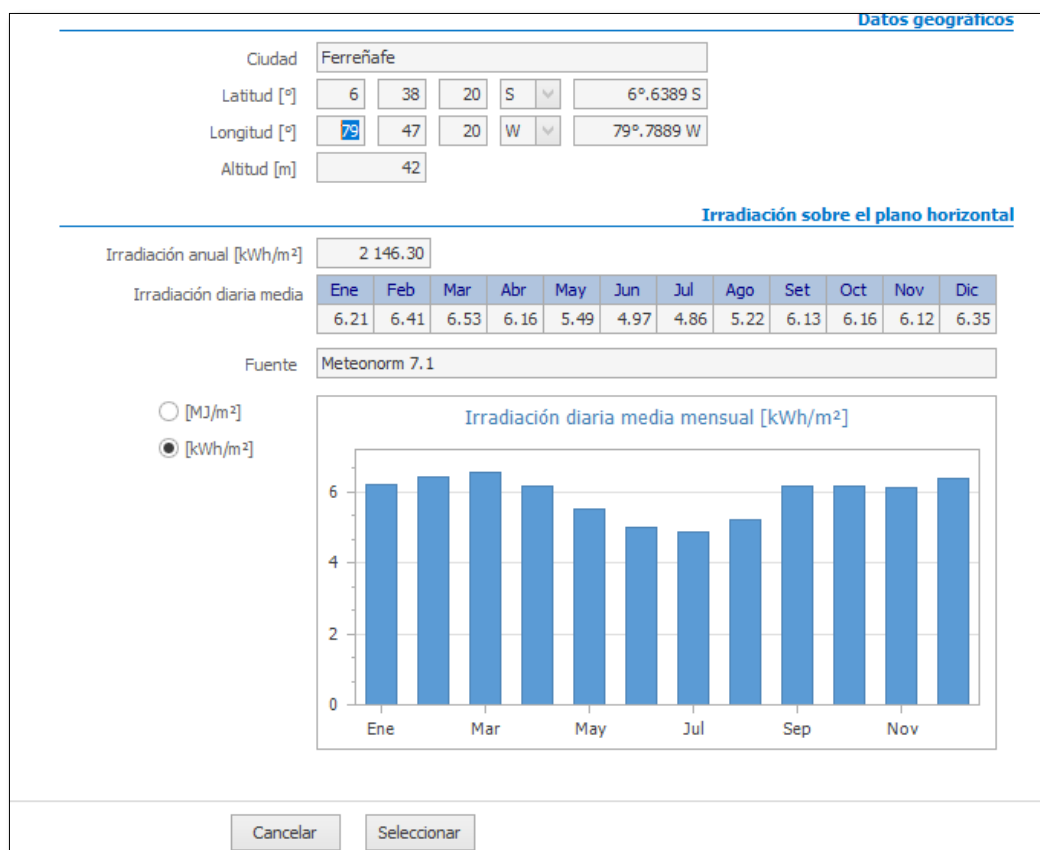
Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days
	°C	%	kWh/m ² /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
January	22.4	60.6%	5.70	90.2	2.5	27.7	0	393
February	22.7	63.9%	5.55	90.1	2.5	26.9	0	364
March	23.0	63.0%	5.84	90.1	2.5	27.3	0	408
April	23.2	58.3%	5.38	90.1	2.8	27.8	0	402
May	23.0	51.0%	4.89	90.2	3.1	27.4	0	410
June	22.4	45.7%	4.47	90.2	3.9	26.3	0	381
July	22.0	41.0%	4.48	90.3	3.8	25.9	0	383
August	22.3	39.6%	4.91	90.3	3.6	27.1	0	395
September	22.6	42.9%	5.59	90.2	3.4	28.5	0	392
October	22.4	47.2%	5.95	90.2	2.9	29.2	0	399
November	21.9	52.3%	5.98	90.2	2.8	28.6	0	370
December	22.1	57.5%	5.86	90.2	2.6	28.4	0	388

Fuente: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>

El mes desfavorable según la Tabla N° 5, es el mes de junio con una radiación solar de 4,47 kWh/m²/día

b) Radiación solar según el software SOLARIUS PLUS

Tabla N° 6: Datos de radiación solar según el Software Solarius Plus



Fuente: Software Solarius Plus

De los datos obtenidos con el software Solarius plus obtenemos una radiación solar en el mes más desfavorable de 4,97 kWh/m²/día

c) Radiación solar según el atlas solar del Perú

Según el atlas solar del Perú³³ la radiación solar (ANEXO 01) es de 4,5 kWh/m²/día

³³ <http://deltavolt.pe/phocadownload/Lambayeque.jpg>

De las tres fuentes el valor de radiación solar que se considerara para el dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico es de: 4,47 kWh/m²/día

5.2. Población y vivienda actual y proyección para el caserío Chillvaca en Incahuasi-Ferreñafe

Tabla N° 7: Tasa de crecimiento poblacional

DEPARTAMENTOS	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015
PERU	1.7	1.6	1.5	1.3
COSTA				
Callao	2.6	2.3	2.1	1.8
Ica	1.7	1.5	1.3	1.2
La Libertad	1.8	1.7	1.5	1.3
Lambayeque	2.0	1.9	1.7	1.5
Lima	1.9	1.7	1.5	1.3
Moquegua	1.7	1.6	1.4	1.3
Piura	1.3	1.2	1.1	0.9
Tacna	3.0	2.7	2.4	2.1
Tumbes	2.8	2.6	2.3	2.0
SIERRA				
Ancash	1.0	0.9	0.8	0.7
Apurímac	0.9	1.0	1.0	1.0
Arequipa	1.8	1.7	1.5	1.3
Ayacucho	0.1	0.3	0.4	0.4
Cajamarca	1.2	1.2	1.1	0.9
Cusco	1.2	1.2	1.1	1.0
Huancavelica	0.9	1.0	0.9	0.9
Huánuco	2.0	1.8	1.7	1.6
Junín	1.2	1.2	1.0	0.9
Pasco	0.4	0.6	0.5	0.4
Puno	1.2	1.2	1.1	1.0
SELVA				
Amazonas	1.9	1.8	1.7	1.5
Loreto	2.5	2.2	2.0	1.9
Madre de Dios	3.3	2.9	2.6	2.3
San Martín	3.7	3.3	2.9	2.6
Ucayali	3.7	3.3	2.9	2.5

Fuente:

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0015/cap-52.htm

Tabla N° 8: Tasa de crecimiento en el departamento de Lambayeque

1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	Promedio
2,0 %	1,9 %	1,7 %	1,5 %	1,78 %

Fuente: elaboración propia

De la tabla N° 8, consideramos el valor promedio, obteniendo un valor de: 1,78 %, proyectado para 20 años

$$P_{20} = P_0(1 + i)^n \dots (7)$$

Donde:

P₀: Población actual (60 habitantes)

P₂₅ : Población proyectada al año 20

i: Taza de crecimiento poblacional (1,78 %)

reemplazando en la ecuación (2) obtenemos que el número de habitantes proyectados para el año 20 es de:

$$P_{20} = 60. (1 + 0,0178)^{20} \approx 85 \text{ habitantes}$$

:

5.3. Requerimientos del sistema de bombeo

5.3.1. Calculo de la energía hidráulica necesaria

Tabla N° 9: Necesidades hídricas de personas y animales

Ganado	Núm.	l / día	Total l/día
Vacuno	50	50	2 500,00
Lanar	40	5	200,00
Cabras	80	5	400,00
Aves de corral	250	0,1	25,00
Caballos y asnos	20	30	600,00
Personas	85	70	5 950,00
	Total(l / día)=		11 610
	V (m³ / día) =		11,61

Fuente: elaboracion propia

Entonces según la Tabla N° 9, la demanda es de:

$$Q = 11,61 \text{ m}^3/\text{día}$$

5.3.2. Carga dinámica total

Para el sistema de bombeo se consideran los siguientes datos:

Nivel estático del agua: 48,0 m

Abatimiento: 1,5 m

Altura de la descarga: 5,0 m

Distancia al depósito: 5 m

Requerimiento diario: 11 610 L/día

La carga estática (CE) se calcula con la adición de las distancias

CE = Nivel estático + Abatimiento + Altura de la descarga

CE = 48,0 m + 1,5 m + 4,0 m = 53,5 m

La carga dinámica (CD) se puede obtener por omisión³⁴

10 % de la longitud total de tubería, entonces tenemos que es: $CD = 0.1 \times$

$$L = 0.1 \times (48 \text{ m} + 1,5 \text{ m} + 5,0 \text{ m} + 4 \text{ m})$$

$$= 0,1 \times 58,5 \text{ m} = 5,85 \text{ m}$$

Entonces,

$$CDT = CE + CD = 53,50 \text{ m} + 5,85 \text{ m} = 59,35 \text{ m}$$

Consideraremos 60 m

5.3.3. Calculo del caudal

Conociendo que la demanda diaria de agua es de 11 610 L/día, para calcula la potencia ahora considerando que toda esa agua va a ser bombeado en las horas de insolación es decir 4,47 h entonces tenemos un caudal de:

$$Q_{promedio} = \frac{11,61}{4,47} m^3/h = 2,60 m^3/h$$

5.3.4. Calculo de la potencia de la bomba sumergible

El cálculo del consumo energético estimado nos muestra la demanda que tendrá nuestra instalación. Dentro del consumo de energía se debe tener en cuenta el autoconsumo que realizan los aparatos electrónicos como el regulador de carga en caso de usar

³⁴ Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guia para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energia fotovoltaica.» Mexico, 2001.

baterías. No obstante, el autoconsumo que realizan estos equipos suele ser del valor del 1% del total de la energía consumida.

$$E_{requerida} = \frac{Volumen H}{367 n_{bomba}} \dots (8)$$

$V_{volumen}$: Volumen en litros (L): 11 610 L

Altura de impulsión (H): 60,0 m

Rendimiento de la bomba en este punto de funcionamiento (η):

0,50

Con estos valores, y sustituyéndolos en la expresión anterior, se obtiene un consumo energético de:

Reemplazando los datos

$$E_{requerida} = \frac{(11\ 610)(60)}{367(0,5)} \approx 3,80\ kWh/dia$$

5.3.4.1. Dimensionamiento de la bomba sumergible LORENTZ

Para poder seleccionar la bomba apropiada hay que considerar:

$Q = 2,60\ m^3/h$

$H = 60\ m$.

$$P_{bomba} = \frac{\gamma Q_{promedio} H_{EB}}{n_b} \dots (9)$$

Reemplazando en la ecuación anterior tenemos.

$$P_{bomba} = \frac{(9800)(2,60/3600)(60)}{0,5} = 849,33\ W$$

Entonces con los datos del caudal y la altura total seleccionamos una bomba sumergible que cumpla con estos requerimientos y además que sea de una marca reconocida

Selección de la bomba

Seleccionamos la bomba LORENTZ PS2- 1800 C-SJ3-18 (ANEXO 02) el cual se ha seleccionado en base a los resultados de altura y caudal calculado en la sección anterior.



Figura N° 21: bomba LORENTZ PS2- 1800 C-SJ3-18

Fuente: <https://www.tmsmx.com/productos/bombas-solares-para-agua/sum/bomba-solar-sumergible-lorentz-ps2-1800-c-sj3-18-1301-detalle>

PS2-1800 C-SJ3-18

Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

Plantilla de datos de la bomba

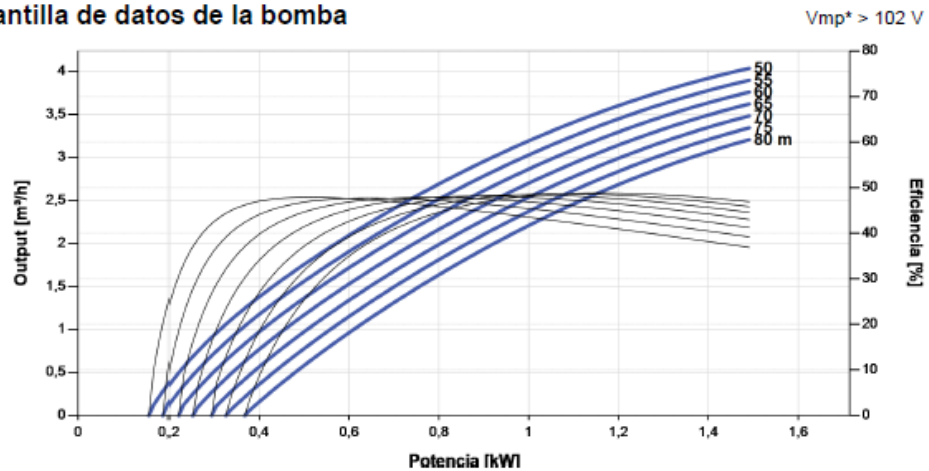


Figura N° 22: Curva característica de la bomba seleccionada

Fuente: <https://renovablesdelsur.com/tiendasp/es/bombeo-solar-directo/702-bomba-solar-lorentz-ps2-1800-hasta-250m.html>

5.3.5. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

5.3.5.1. Dimensionamiento del generador fotovoltaico

Para determinar la energía en el generador fotovoltaico y la potencia, hay que considerar las pérdidas ocasionadas en el controlador, pérdidas de potencia por efecto joule en los conductores, no trabajar en el punto de máxima potencia de los módulos fotovoltaicos, etc. Para facilitar el cálculo de la potencia del generador estas pérdidas se agrupan en un coeficiente que

recoge el rendimiento energético de la instalación; para el caso de sistemas con regulador se considera: 0,7 ³⁵

$$E_{elec} = \frac{E_{requerida}}{0,7} \dots (10)$$

$$E_{elec} = 3,80/0,7 = 5,43 \text{ kWh/dia}$$

$$Pot = 1,214 \text{ kW}$$

Consideramos trabajar con paneles solares SIMAX de 190 Wp por ser una marca reconocida y de potencia comerciable (ANEXO 03)

Para establecer la conexión de paneles solares en serie o en paralelo, teniendo en cuenta que el módulo seleccionado según el ANEXO 02, la tensión mínima para el funcionamiento V_{mp} es de 102 V. La tensión V_{mp} del panel solar es de 36,3 V; resulta entonces que el número de paneles solares que se tendrá que colocar en serie para alcanzar como mínimo la tensión V_{mp} del motor eléctrico de la bomba.

El número de paneles solares que hay que colocar en serie

Para determinar el número de paneles solares en serie hay que considerar la bomba sumergible LORENTZ tiene una tensión mínima para su funcionamiento de 102 V. La tensión V_{mp} .

³⁵ (Agustin Castejon s.f.)

A partir de este dato el número de paneles en serie se obtiene con la siguiente ecuación:

$$N_{S\,mf} > V_{de\,trabajo} / V_{mp,module}$$

$$N_{S\,mf} > 102/36,5=2,79 \approx 3 \text{ paneles solares}$$

Entonces el número mínimo de paneles solares conectados en serie serán 3, nosotros consideraremos 4 paneles solares en serie

El número de ramas en paralelo de módulos se calculará con la siguiente ecuación:

$$N_{P\,mf} = 1\,214/(190 \times 4) = 1,60 \approx 2 \text{ ramas en paralelo}$$

*Entonces el generador fotovoltaico estara conformado
por 8 paneles solares SIMAX de 190 Wp*

5.3.5.2. Dimensionamiento del controlador

Para la selección del regulador de carga es necesario calcular cual será la máxima corriente que deberá soportar, tanto en la entrada como a la salida del propio regulador.

Para el cálculo de la máxima corriente de entrada del regulador (I_{Re}) que proviene directamente del panel, se emplea la siguiente expresión:

Corriente de entrada a regulador:

$$I_{\text{entrada al regulador}} = 1,25 \times I_{cc} \dots (11)$$

$$I_{\text{entrada al regulador}} = 1,25 \times (2 \times 5,52) = 13,80 \text{ A}$$

Corriente de salida del regulador:

$$I_{\text{salida del regulador}} = 1,25 \times \frac{P_{\text{bomba}}}{V} \dots (12)$$

Reemplazando datos:

$$I_{\text{salida del regulador}} = 1,25 \times \frac{849,33}{96} = 11,06 \text{ A}$$

El regulador seleccionado deberá soportar como mínimo una corriente de entrada de 13,80 A y una corriente de salida de 11,06 A

5.3.5.3. Dimensionamiento de los conductores eléctricos

El cableado eléctrico que forma parte de la instalación objeto de este tutorial se compone de dos tramos principales:

Tramo 1: desde la caja de conexión de los módulos solares hasta el regulador de carga.

Tramo 2: que comprende desde la salida del regulador hasta la conexión a los bornes del motor eléctrico de la bomba sumergible.

En ambos casos, todos los tramos serán en corriente continua/directa (DC) y se compondrán de dos conductores activos, uno positivo y otro negativo, que serán de igual sección a lo que resulte del cálculo que se desarrollará a continuación, más el cable de protección. La sección se

elige en función de la longitud de los cables y de la corriente que circula por ellos con el fin de minimizar las caídas de tensión.

a). Cálculo de la Intensidad máxima que debe soportar el tramo campo fotovoltaico – regulador

$$I_{MAX\ mf} = 1,25 \times I_{CC\ mf} \times N_{ramas\ en\ paral.\ x\ regulador} \dots (13)$$

Donde:

$I_{MAX\ mf}$ = Corriente máxima en la línea Paneles-Regulador (A).

$I_{CC\ mf}$ = Corriente de cortocircuito del panel utilizado (A).

$N_{ramas\ en\ paral.\ x\ regulador}$ = Número de ramas de paneles que deben conectarse a cada regulador.

1,25 = Factor de sobredimensionamiento del 25 % para cubrir el exceso de corriente de cortocircuito debido al aumento de la irradiancia y temperatura. (Los paneles pueden calentar hasta los 75°), podemos disponer irradiancia ocasional de 1200 W/m².

$$I_{MAX\ mf} = 1,25 \times 5,52 \times 2$$

$$I_{MAX\ mf} = 13,80\ A$$

b). Cálculo de la intensidad máxima que debe soportar el tramo regulador – bornes del motor de la bomba sumergible

$$I_{MAX\ bomba} = 1,25 \times P_{motor} / V \dots (14)$$

Donde:

I_{MAX} = Corriente máxima en el tramo (A).

P_{motor} = Potencia del motor de la bomba (w)

$V_n = 96 \text{ V}$

$$I_{MAX} = 1,25 \times \frac{849,33}{96}$$

$$I_{MAX} = 11,06 \text{ A}$$

calcularemos la corriente eléctrica y calculamos la caída de tensión para una sección determinada considerando que esta caída de tensión están dentro de las tolerancias que se muestran en la siguiente tabla N° 10

Tabla N° 10: Caída de tensión por cada tramo del sistema de bombeo fotovoltaico

Tramo 1: desde la caja de conexión del módulo solar hasta el regulador de carga, en este tramo la máxima caída de tensión es de 1 %. La corriente eléctrica en este tramo está dado por:
Tramo 2: desde la salida del regulador hasta la conexión a los bornes del motor eléctrico de la bomba, La caída de tensión es de 3%.

Fuente: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn193.html>

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta V} \dots (15)$$

ΔV = Caída de tensión máxima permitida para cada tramo (V).

I = Corriente eléctrica (A)

ρ = Resistividad [$\Omega \cdot mm^2/m$]

$$S_{CABLE} = \frac{2 \times L \times I_{MAX}}{\sigma \times \Delta V} = \frac{2 \times L \times I_{MAX}}{56 \times \Delta V} \dots (16)$$

Cálculo de la sección mínima del conductor para el tramo paneles – regulador

$$S_{CABLE} = 2 \times L \times I_{MAX} \left(\frac{1}{56 \times \Delta V} \right) \dots (17)$$

$$S_{CABLE} = 2 \times 4 \times 13,80 / (56 \times 1,46)$$

$$S_{CABLE} = 1,35 \text{ mm}^2$$

Cálculo de la sección mínima del conductor para el tramo regulador – bomba

De la formula (17)

$$S_{CABLE} = 2 \times L \times I_{MAX} / (56 \times \Delta V)$$

$$S_{CABLE} = 2 \times 55 \times 11,06 / (56 \times 2,88)$$

$$S_{CABLE} = 7,54 \text{ mm}^2$$

Tabla N° 11: Conductores eléctricos THW-90

TABLA DE DATOS TECNICOS THW - 90 (mm ²)								
CALIBRE CONDUCTOR	NUMERO HILOS	DIAMETRO HILO	DIAMETRO CONDUCTOR	ESPESOR AISLAMIENTO	DIAMETRO EXTERIOR	PESO	AMPERAJE (°)	
							AIRE	DUCTO
mm ²		mm	mm	mm	mm	Kg/Km	A	A
2.5	7	0.66	1.92	0.8	3.5	32	37	27
4	7	0.84	2.44	0.8	4.1	47	45	34
6	7	1.02	2.98	0.8	4.6	67	61	44
10	7	1.33	3.99	1.1	6.2	117	88	62
16	7	1.69	4.67	1.5	7.7	186	124	85
25	7	2.13	5.88	1.5	8.9	278	158	107
35	7	2.51	6.92	1.5	10	375	197	135
50	19	1.77	8.15	2	12.3	520	245	160
70	19	2.13	9.78	2	13.9	724	307	203
95	19	2.51	11.55	2	15.7	981	375	242
120	37	2.02	13	2.4	18	1245	437	279
150	37	2.24	14.41	2.4	19.4	1508	501	318
185	37	2.51	16.16	2.4	21.1	1866	586	361
240	37	2.87	18.51	2.4	23.5	2416	654	406
300	37	3.22	20.73	2.8	26.5	3041	767	462
400	61	2.84	23.51	2.8	29.3	3846	908	541
500	61	3.21	26.57	2.8	32.3	4862	1037	603

Fuente: <http://www.promelsa.com.pe/pdf/1000464.pdf>

De los resultados anteriores se utilizará:

En el tramo 1: conductor de 2,5 mm²

En el tramo 2: conductor de 10 mm²

Cableado de protección:

Para la protección y seguridad de la propia instalación, habrá que instalar un cable adicional, además de los cables activos (positivo y negativo), que será el cable de protección y que servirá para conectar todas las masas metálicas de la instalación con el sistema de tierra, con el objetivo de evitar que aparezcan diferencias de potencial peligrosas, y al mismo tiempo permita descargar a tierra las corrientes de defectos o las debidas por las descargas de origen atmosférico.

El cable de protección será del mismo material que los conductores activos utilizados en la instalación, en este caso de cobre, e irán alojados todos los cables por el mismo conducto para su protección.

La sección que deben tener el conductor de protección en función de la sección de los conductores activos viene dada por la siguiente tabla.

Tabla N° 12: Sección mínima de los conductores de protección

Sección de los conductores activos de la instalación, $S \text{ (mm}^2\text{)}$	Sección mínima de los conductores de protección, $S_p \text{ (mm}^2\text{)}$
$S \leq 16$	$S_p = S$
$16 < S \leq 35$	$S_p = 16$
$S > 35$	$S_p = S/2$

Fuente: Instalación solar fotovoltaica para el bombeo de agua para riego.pdf

Tabla N° 13: Sección del conductor de protección

TRAMO	Sección del conductor activo (mm ²)	Sección del conductor de protección (mm ²)
PANELES-REGULADOR	2,5	2,5
REGULADOR-BOMBA SUMERGIBLE	10	10

Fuente: elaboración propia


5.3.5.4. Elementos de protección

Los componentes del sistema fotovoltaico y de cualquier sistema eléctrico en general pueden generar o transmitir sobrecorriente que pueden reducir la vida del componente o este podría fallar.

a). Protección del generador fotovoltaico: Del diagrama unifilar observamos que tenemos 2 grupos de dos módulos conectados en serie por lo que es necesario una protección contra corrientes inversas en cada rama, como la caja de conexiones del generador fotovoltaico tiene fácil acceso para mantenimiento, se opta por fusibles en bases portafusibles seccionables:

Calibre de los fusibles: $I_F = 1,5 \dots 2 \cdot I_{sc} = 1,5 \times 5,52 \dots 2 \times 5,52$
 $A = 8,28 \dots 11,04 \text{ A}$
 Elegimos cartuchos fusibles de 10 A

Tabla N° 14: Modelos de fusibles

	Fusibles serie PF10						
	I_n [A]	Modelo	Código	Potencia disipada [W]	I^2t Total [A ² s]	Peso [kg]	Embalaje [pcs]
	4	PF10 4A gR	38696	0,69	45	0,01	20
	6	PF10 6A gR	38697	0,95	48	0,01	20
	8	PF10 8A gR	38698	1,43	129	0,01	20
	10	PF10 10A gR	38699	1,62	271	0,01	20
	12	PF10 12A gR	38700	2,16	371	0,01	20
	16	PF10 16A gR	38701	3,18	501	0,01	20
	20	PF10 20A gR	38702	3,82	565	0,01	20
Especificaciones							
Modelo	PF10						
Tensión de Uso	U_n		900 V d.c.				
Constante de tiempo (L/R)	τ		3 ms				
Poder de Corte (RMS)	I_l		30 kA				

fuelle: fusiblegR.pdf

b). Fusible para el generador fotovoltaico

Se pondrá un interruptor para aislar los módulos fotovoltaicos del controlador, de las siguientes características:

Corriente asignada es de $I_n > 2I_{sc} = 2 \times 5,52 \text{ A} = 11,04 \text{ A}$

seleccionamos un fusible de 12 A

c). Sistema de puesta a tierra

Por razones de seguridad para el usuario, debemos evitar que el cuerpo humano sea conductor y pueda sufrir algún daño fatal.

En la puesta a tierra, la sección es de Cu y conectarán los equipos. La sección mínima de la línea principal de tierra es de 10mm² según el CNE, y esta será la utilizada.

El tipo de sistema de puesta a tierra será el de varilla, esto es debido a la baja potencia y, por ende, bajo amperaje.

5.3.5.5. Angulo óptimo de inclinación

La orientación óptima será un valor constante, con una inclinación (β) que va a depender de la latitud (φ) del lugar y un acimut (α) que depende del hemisferio en el que está situado el generador.

Si pretendemos maximizar la captación de energía solar, la superficie se debe orientar hacia el Sur si está situada en el hemisferio norte o hacia el Norte si es está en el hemisferio sur.

Para determinar la inclinación óptima de una superficie fija se usa una fórmula basada en análisis estadísticos de radiación solar anual sobre superficies con diferentes inclinaciones situadas en lugares de diferentes latitudes, que proporciona la inclinación óptima en función de la latitud del lugar:

$$\beta_{opt} = 3,7 + (0,69 \times |\varphi|) \dots (18)$$

donde:

β_{opt} : Angulo de inclinación optimo

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

La fórmula es válida para aplicaciones de utilización anual que busquen la máxima captación de energía solar a lo largo del año. Por lo tanto, tomando en cuenta el método de inclinación óptima anual, se ingresan los datos en la fórmula; sabiendo que la latitud es de -6, 1216900000.

$$\beta_{opt} = 3,7 + (0,69 \times |-6,12169^\circ|)$$

$$\beta_{opt} = 7,92^\circ$$

luego el ángulo óptimo es de $7,92^\circ$ y es la inclinación que deben tener los paneles solares para recolectar la mayor cantidad de energía solar durante el día.

Según el reglamento técnico RD 003-2007-EM/DGE. Debe tener un ángulo de inclinación no menor de 10° . Para nuestro proyecto consideraremos una elevación de 10° por estar más cerca del óptimo.

5.3.6. Tanque de almacenamiento

Asumiendo un tanque de base cuadrada, su volumen está dado por:

$$V = L^2 \cdot h \dots (19)$$

donde L es la longitud del lado del cuadrado de la base.

h es la altura del tanque.

Considerando 2 días de autonomía entonces el volumen del tanque será de $23,22 \text{ m}^3$. Si la altura del tanque es de 3 m entonces la longitud del lado de la base es de $2,78 \text{ m} \approx 2,80 \text{ m}$

práctica los tanques tienen cierta elevación sobre el suelo, de manera que asumiremos que la base estará ubicada 1m por sobre el nivel del suelo. La altura de la salida que alimenta al tanque deberá superar el nivel del agua:

$$1 \text{ m} + 3 \text{ m} = 4 \text{ m}$$

5.3.7. Presupuesto referencial del sistema fotovoltaico para bombeo de agua

5.3.7.1. Costo del sistema de bombeo fotovoltaico

Considerando la propuesta de reemplazar el sistema de bombeo actual por el sistema de bombeo fotovoltaico entonces tenemos:

Tabla N° 15: Costo de inversión de un sistema de bombeo fotovoltaico

DESCRIPCIÓN	Costo/unitario (S/.)	Costo (S/.)
01 bomba sumergible LORENTZ PS2- 1800 C-SJ3-18 +CONTROLADOR	11 572,00	11 572,00
08 paneles solares SIMAX 190 Wp	741,00	5928,00
02 estructura para 04 paneles solares	1 255,00	2 510,00
Accesorios	1 000,00	1 000,00
Tanque de almacenamiento	5 000,00	5 000,00
Total, del Suministro		26 010,00

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 16: Costo de inversión de la propuesta

DESCRIPCIÓN	TOTAL (S/.)
SUMINISTRO	26 010,00
TRANSPORTE	1 300,50
MONTAJE ELECTROMECAÁNICO	2 601,00
COSTO DIRECTO	29 911,50
GASTOS GENERALES	1 495,58
SUB TOTAL SIN IGV	31407.08
IGV	5 653,27
COSTO TOTAL	37 060,35

Fuente: elaboración propia

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

- a) La demanda de agua es de 11 610 L /día, que incluye 85 personas proyectadas y animales.
- b) La radiación solar promedio mensual de todo un año por medio de datos estadísticos brindados por la página de la NASA (4,47 kWh/m²/día), del atlas del SENAMHI (4,50 kWh/m²/día) y del software SOLARIUS PLUS con un valor mínimo de 4,97 kWh/m²/día, se consideró de las tres fuentes el menor valor de radiación solar 4,47 kWh/m²/día.
- c) Se seleccionó la Bomba sumergible **LORENTZ PS2- 1800 C-SJ3-18**, cuyos datos técnicos se encuentran en el ANEXO 02; 08 paneles solares de 190 Wp de la marca SIMAX
- d) El presupuesto referencial del sistema fotovoltaico para el bombeo de agua es de S/. 37 060,35

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Agustin Castejon, German Santamaria. *instalaciones solares fotovoltaicas*. España, s.f.
- 2) Alata Rey, Josue Eliezer. *Dimensionamiento de un sistema de bombeo con paneles solares- caso UNALM*. Lima, 2015.
- 3) Cabrera peña, Ignacio, y Rigoberto Fermin Montiel. «Celdas fotovoltaicas para energizar un sistema de bombeo de agua.» Mexico, 2003.
- 4) Canales Ciudad, Carlos. «Guia solar fotovoltaica 2012.» 2012.
- 5) Castejon, Agustin. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. España, 1998.
- 6) Cerdan Cabrera, Ana Maria. «Diseño de un sistema solar eolico para consumo de agua en cabañas ecoturísticas en la Pitaya Veracruz Mexico.» Veracruz, 2011.
- 7) Diaz Corcobado, Tomas. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Mexico, 2008.
- 8) Energia Innovadora. «Cotizacion del sistema fotovoltaico de bombeo de agua.» 2017.
- 9) FOTOVOLTAICA, ENERGIA. «manual sobre tecnologías, proyecto e instalacao .» s.f.
- 10) Heras Sanchez, Miguel Armando. «Análisis de un sistema de riego automatizado alimentado por energía fotovoltaica utilizando PLC.» Ecuador, 2017.
- 11) Hernandez Quijaite, Luis Eugenio. «Bombeo de agua con energia solar en el departamento de Ica.» Ica, s.f.
- 12) Ixtebe Portabelle, Cilveti. «Proceso de creacion de una planta solar fotovoltaica conectada a red.» Barcelona, 2010.

- 13) Joachin Barrios, Carmencita De los Angeles. «Diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado para el suministro de energía eléctrica a la comunidad Buena Vista, San Marcos.» Guatemala, 2008.
- 14) Lima Solares, Job Lizardo. «Control electrónico de un sistema de bombeo de agua accionado por energía solar.» 1997.
- 15) Maldonado Rodas, Eddi Alberth. «Paneles solares como fuente de energía eléctrica para sistemas de mini riego en producción de hortalizas en el departamento de quiché.» 2011.
- 16) Moran Santamaria, Jorge Maximo. «Análisis y Evaluación para la Viabilidad Técnico Económico en el uso de la Energía Solar Fotovoltaica para el Centro Poblado Cruz de Pañalá – Distrito de Mórrope.» Lambayeque, 2013.
- 17) Muñoz Anticona, Delfor Flavio. «Aplicación de la energía solar para electrificación rural en zonas marginales del país.» Lima, 2005.
- 18) Natael Elenes, Felix. «Análisis de factibilidad de un sistema de bombeo de agua con energía solar como propuesta de adaptación para riego en rayón, Sonora.» Sonora, 2012.
- 19) Natanael Elenes, Felix. «Análisis de factibilidad de un sistema de bombeo de agua con energía solar como propuesta de adaptación para riego en rayón, Sonora.» 2012.
- 20) Paredes Rubio, Arturo Romero. «Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.» Mexico, 2001.
- 21) SENAMHI. «Atlas de energía solar del Perú.» 2003.
- 22) Valdiviezo Salas, Paulo Daniel. «Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica a 15 computadoras portátiles en la PUCP.» Lima, 2014.

ANEXOS

ANEXO A. RADIACIÓN SOLAR EN LAMBAYEQUE- MAPA SOLAR DEL PERÚ

ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA SUMERGIBLE PS2-1800 C-SJ3-18 LORENTZ

ANEXO C. FICHA TÉCNICA DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SELECCIONADOS

ANEXO D. CATALOGO DE CABLES THW-90

ANEXO E. PLANO DE EQUIPAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEO

ANEXO F. PLANO DE MONTAJE DE PANELES SOLARES