



**UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”
ESCUELA DE POST GRADO**



DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA LA EXPLOTACIÓN
DE AGUA SUBTERRÁNEA, CUENCA MOTUPE – OLMOS – LA
LECHE**

TESIS

Presentada para optar el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

AUTOR:

MSc. José Luis Farfán Neyra

ASESOR:

Dr. Walter Campos Ugaz

LAMBAYEQUE – Perú

2018

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA, CUENCA MOTUPE-OLMOS-LA LECHE

MSC. JOSE LUIS FARFAN NEYRA

AUTOR

Dr. WALTER CAMPOS UGAZ

ASESOR

**Tesis presentada a la Escuela de Post Grado de la Universidad
Nacional Pedro Ruiz Gallo, para optar el Grado de DOCTOR EN
CIENCIAS AMBIENTALES.**

APROBADA POR:

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

Octubre de 2018

DEDICATORIA

A MIS PADRES, QUIENES DESDE EL CIELO
ILUMINAN MI CAMINO.

AGRADECIMIENTOS

AL Dr. WALTER CAMPOS UGAZ, POR SU
INVALORABLE ORIENTACIÓN EN EL
DESARROLLO DEL PRESENTE TRABAJO

ÍNDICE

	Páginas
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
SOMMARIO	ix
RESUMO	x
 CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	 1
 CAPITULO 2. RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO Y SOLAR DISPONIBLE EN LA CUENCA MOTUPE-OLMOS- LA LECHE.	 3
 CAPITULO 3. INGENIERÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA MOTUPE- OLMOS-LA LECHE	 10
 CAPITULO 4. IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS QUE SE GENERAN MEDIANTE BOMBEO CON COMBUSTIBLES FOSILES Y BOMBEO SOLAR	 26
 CAPITULO 5. CALCULO DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR CON FINES AGRICOLAS	 29
 CAPITULO 6. CONSIDERACIONES TECNICO-ECONOMICAS DEL BOMBEO SOLAR	 33
 CAPITULO 7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES.....	 36
 CAPITULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	 38
 ANEXOS	 39
 ANEXO 01: MAPA SOLAR DEL PERU: LAMBAYEQUE	
ANEXO 02: DATOS DE RADIACION SOLAR-PAGINA NASA	
ANEXO 03: GRAFICA DE VISCOSIDAD DE FLUIDOS	
ANEXO 04: DIAGRAMA DE MOODY	
ANEXO 05: MODULOS Y COEFICIENTES DE LOS CULTIVOS	
ANEXO 06: DATOS TECNICOS DE POZOS DE AGUA SUBTERRANEA CUENCA MOTUPE-OLMOS-LA LECHE(EN CD)	

Título: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA LA
EXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA,
CUENCA MOTUPE-OLMOS-LA LECHE

Autor: JOSE LUIS FARFAN NEYRA

Asesor: Dr. WALTER CAMPOS UGAZ

Nº de páginas: 51

Año : 2018

Institución: UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ
GALLO- LAMBAYEQUE
ESCUELA DE POST GRADO

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto de tesis radica en el uso de la energía solar fotovoltaica en la explotación de aguas subterráneas para fines agrícolas en la Cuenca Motupe- Olmos-La Leche, como mejor alternativa con respecto al método tradicional del bombeo de agua utilizando grupos electrógenos o energía eléctrica.

La zona de estudio, según el Mapa Solar del Perú elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en convenio con el Ministerio de Energía y Minas (MEM) cuenta con una alta disponibilidad de radiación solar diaria, cuyo rango oscila entre 5,5 y 6,0 Kwh/m² día.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Ministerio de Agricultura (MINAG) al año 2014 reporta la existencia de 4339 pozos de aguas subterráneas en la zona de estudio, la misma que comprende las localidades de Motupe. Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope, Pítipo y Salas, cuya explotación se hace generalmente utilizando grupos electrógenos (motores de combustión interna, quemando petróleo o gasolina). Este reporte contiene las características técnicas, mediciones y explotación de los pozos (caudales).

Teniendo en cuenta la disponibilidad de la radiación solar local, la demanda hídrica diaria, se determina las características técnicas de diseño de un sistema que permita explotar las aguas subterráneas para fines agrícolas mediante el uso de la energía solar, promoviendo de esta manera la aplicación sostenible de la energía fotovoltaica, como una alternativa limpia y libre de la emisión de gases de efecto invernadero.

PALABRAS CLAVE: bombeo solar, agua subterránea, radiación solar, SENAMHI, MEM

Title : PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY FOR
EXPLOTATION OF UNDERGROUND WATER,
BASIN MOTUPE-OLMOS-LA LECHE
Author: JOSE LUIS FARFAN NEYRA
Adviser: Dr. WALTER CAMPOS UGAZ
Nº of pages: 51
Year : 2018
Institution : PEDRO RUIZ GALLO NATIONAL
UNIVERSITY- LAMBAYEQUE
POST GRADE SCHOOL.

ABSTRACT

The objective of the present project of thesis lies in the use of the photovoltaic solar energy in the exploitation of underground water with agricultural purposes in the basin Motupe-Olmos-La Leche, as a better alternative with respect to the traditional method of pumping water using electrogen groups or electric energy,

The study zone, according with the Solar Map of Peru elaborated by the Meteorology and Hydrology National Service (SENAMHI) in agreement with the Energy and Mines Minister (MEM) has a high available daily solar radiation, whose values oscillates between 5,5 and 6,0 Kwh/m² day.

The Water National Authority (WNA) of the Agricultural Minister (AM) to 2014 reports the existence of 4339 underground water wells in the study zone, the same that it involves the localities of Motupe, Olmos, Pacora, Jayaca, Chochope, Pitipo and Salas, whose exploitation is made generally using electrogen groups (inner combustion motors, burning oil and gasoline). This report contains technical characteristic, measurements and exploitation of wells (volume of water).

Taking account the available of the local solar radiation, the daily hydric demand, it is determined the technical characteristics of design of a system that let the exploit of underground water with agricultural purposes trough the use of the solar energy, promoting in this way the supporting application of the photovoltaic energy, as a clean alternative and free of emission of gases of greenhouse effect.

Keywords: solar pumping, underground water, solar radiation, SENAMHI, MEM.

Titolo: ENERGIA SOLARE FOTOVOLTAICA PER LO
SFRUTTAMENTO DELLE ACQUE
SOTTERRANEE DEL BACINO DI MOTUPE,
OLMOS E LA LECHA

Autore: JOSE LUIS FARFAN NEYRA

Consulente: Dr. WALTER CAMPOS UGAZ

N° di pagine: 51

Anno : 2018

Istituzione: UNIVERSITÀ NAZIONALE PEDRO RUIZ
GALLO-SCUOLA DI POST GRADUAZIONE

SOMMARIO

L'obiettivo del presente progetto di tesi si centra nell'uso dell'energia solare fotovoltaica per lo sfruttamento delle acque sotterranee per fini agricoli nel bacino di "Motupe", "Olmos" e "La Leche", come una migliore alternativa rispetto al método tradizionale di pompaggio dell'acqua che utilizza energie fossili (combustibili) e energia elettrica.

La zona di studio, secondo la mappa solare del Perú elaborata dal servizio nazionale di meteorologia e idrologia (SENAMHI) in accordo con il Ministero dell'Energia e delle Miniere mostra una alta disponibilità di radiazione solare quotidiana, la cui gamma varia tra 5,5 e 6,0 Kwh/m² al giorno.

L' Autorità Idrica Nazionale (ANA) del Ministero dell' Agricoltura per l' anno 2014 riporta l'esistenza di 4339 pozzi di acque sotterranee nella zona di studio, lo stesso che include le località di Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope, Pitipo e Salas, il cui sfruttamento è fatto generalmente usando energie fossili (motori a combustione interna, che utilizzano gasolio o benzina). Questo informe mostra le caratteristiche tecniche: idrauliche, fisiche, quimiche, etc e di sfruttamento dell pozzi.

Tenendo conto della disponibilità della radiazione solare locale, il fabbisogno idrico giornaliero, è determinato dalle caratteristiche tecniche del disegno di un sistema che consente di sfruttare le acque sotterranee per fini agricoli utilizzando l'energia solare, promuovendo in questo modo l'applicazione sostenibile dell'energia fotovoltaica, come una alternativa pulita e senza emissioni di gas a effetto serra.

PAROLE CHIAVE: pompaggio solare, acqua sotterranea, radiazione solare, SENAMHI, MEM.

**Título: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA A
EXPLORAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS,
CUENCA MOTUPE – OLMOS – LA LECHE**

Autor: JOSE LUIS FARFAN NEYRA

Assessor: Dr. WALTER CAMPOS UGAZ

Nº de páginas: 53

Ano : 2018

**Instituição: UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ
LAMBAYEQUE, SCOLA DO POST GRADE**

RESUMO

O objetivo deste projeto de tese é a utilização de energia solar fotovoltaica na exploração de água subterrânea para fins agrícolas na bacia do Motupe-Olmos-La Leche, como a melhor alternativa ao método tradicional de bombeamento de água usando geradores ou energia elétrica.

A área de estudo, de acordo com o Mapa Solar do Peru, elaborado pelo Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia (SENAMHI) em convênio com o Ministério de Energia e Minas (MEM), possui alta disponibilidade de radiação solar diária, cuja faixa varia entre 5,5 e 6,0 Kwh / m² dia.

A Autoridade Nacional de Águas (ANA) do Ministério da Agricultura (MINAG) para 2014 relata a existência de 4339 poços de água subterrânea na área de estudo, o que inclui as localizações da Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope, Pítipo e Salas, cuja exploração é geralmente feita usando geradores (motores de combustão interna, queima de óleo ou gasolina). Este relatório contém as características técnicas, medições e exploração dos poços (fluxos).

Tendo em conta a disponibilidade de radiação solar local, a demanda diária de água, as características técnicas do projeto de um sistema são determinadas permitindo explodir as águas subterrâneas para fins agrícolas através do uso de energia solar, promovendo assim a aplicação sustentável da energia fotovoltaica, como alternativa limpa e livre à emissão de gases de efeito estufa.

PALAVRAS-CHAVE: bombeamento solar, água subterrânea, radiação solar, SENAMHI, MEM.

CAPITULO 1: INTRODUCCION

La radiación que emite cotidianamente el sol como astro dador de vida constituye una fuente de energía inagotable, universal, ecológica, gratuita y de disponibilidad inmediata; la misma que puede ser utilizada para la generación de calor y electricidad mediante el uso de colectores solares y paneles fotovoltaicos respectivamente. La tierra recibe del sol una potencia promedio diaria de $1,2 \times 10^{17}$ Watts.

A nivel nacional y en la actualidad, la explotación de las aguas subterráneas se hace generalmente empleando motores de combustión interna y bombas hidráulicas instalados en pozos ya sea tubulares o a tajo abierto, empleándose como fuente de energía los combustibles fósiles (petróleo, gasolina), originando altos costos de precio, operación y mantenimiento de estos sistemas de bombeo, adicionando a esto la contaminación atmosférica local debido a la emisión de gases tóxicos por la quema de dichos combustibles (CO_2 , SO_2 , NO_x , Pb).

El uso de la energía eléctrica para la explotación de las aguas subterráneas es una buena alternativa, pero para esto el propietario tiene que invertir en la elaboración de un expediente técnico y la ejecución de su obra para luego contar con el suministro eléctrico de parte de la empresa concesionaria de electricidad, cuya facturación por el consumo de la energía eléctrica está supeditada a una potencia contratada mensual y a una tarifa eléctrica industrial asignada.

En este escenario, el propietario se obliga a cancelar mensualmente a la concesionaria de electricidad el costo por la potencia contratada asignada consumiendo o no la energía eléctrica, lo que se ha visto en algunos casos que el propietario ha tenido que resolver el contrato con dicha entidad y retomar el funcionamiento de sus pozos mediante la quema de combustibles fósiles, perdiendo su inversión y quedándose con una infraestructura eléctrica sin utilizar. Esta situación peculiar se presenta debido a que los cultivos que se siembran en la zona de estudio requieren planes de riego sólo en ciertos periodos del año.

Ante la problemática expresada líneas arriba, existe la alternativa y como objetivo general explotar las aguas subterráneas mediante el uso de la energía solar fotovoltaica para el desarrollo agropecuario y humano, i.e: bombeo solar fotovoltaico; alternativa que en nuestro país de manera muy exigua y aislada se viene utilizando, esto estriba debido al escaso conocimiento sobre las bondades que ofrece el bombeo solar, a la desconfianza de que este sistema pueda funcionar y al alto costo inicial de su instalación, siendo este último el principal obstáculo para su uso generalizado. Situación que puede revertirse mediante charlas técnico-educativas que permitan concientizar al usuario de que se trata de un sistema confiable, duradero, gratuito, ecológico y que como en todo proyecto u obra en ingeniería se debe hacer una inversión inicial, cuyo costo depende fundamentalmente del recurso hídrico a explotar y de la disponibilidad de la irradiancia solar local.

Como objetivos específicos se plantea: determinar el recurso hídrico que se requiere para satisfacer la demanda agrícola según el tipo de cultivo que se siembra, utilizar el recurso solar disponible en la zona de estudio, seleccionar los elementos componentes del sistema solar fotovoltaico, evaluar los impactos ambientales negativos que se generan y una comparación técnico – económico entre el bombeo solar y el bombeo con combustibles fósiles.

El principio fundamental del bombeo solar consiste en el bombeo diurno de un caudal de agua instantáneo, relativamente bajo, de manera ininterrumpida y aprovechando el mayor tiempo de irradiancia solar disponible del lugar. Este principio dista mucho del tradicional, el cual emplean grupos electrógenos de alta potencia, sobredimensionados, bombeando agua de manera excesiva, afectando la reserva hídrica del acuífero y durante un corto periodo de tiempo. Un aspecto singular que tiene el bombeo solar es que permite acumular agua mediante el uso de reservorios en lugar de acumular energía, razón por la cual no se requiere el uso de baterías.

A nivel mundial existe una importancia creciente en la elección de generar formas limpias de energía, sobre todo para proyectos de poca potencia como es el caso del bombeo solar; además del ahorro económico a mediano plazo que implica el uso de este método de extracción de agua es también fiable y seguro para la supervivencia de la población beneficiada.

El presente proyecto de tesis está orientado al uso de la energía solar fotovoltaica en la Cuenca Motupe-Olmos- La leche para la explotación de aguas subterráneas con fines agrícolas, de consumo humano y pecuario; el análisis o tratamiento se puede aplicar en cualquier parte de nuestro país.

De acuerdo al Atlas de Energía Solar del Perú, elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en coordinación con el Ministerio de Energía y Minas (MEM) del año 2003 indica que en la zona norte de nuestro país comprendido entre las latitudes 3° y 8° Sur se cuenta con una alta disponibilidad de energía solar diaria; cuyos valores oscilan entre 5,5–6,0 Kwh/m² día, lo que garantiza con menores costos la explotación de las aguas subterráneas mediante el empleo de sistemas fotovoltaicos.

La matriz energética del Perú elaborado por el Comité de Operación Económica del Sistema (COES) a enero de 2017 indica que la mayor fuente de generación de energía eléctrica a nivel nacional es la hidroeléctrica con el 67,1 %, seguida del gas natural con el 28,9 % y las energías renovables como la eólica y solar contribuyen escasamente con el 1,4 % y 0,4 % respectivamente. Esto hace pensar que no se cuenta con una política agresiva de parte del estado en tratar de explotar las energías renovables y en particular la energía solar a fin de mejorar nuestra matriz energética, tenemos radiación solar todos los días y aún no hemos aprendido a cosecharla; las energías renovables ya no es una opción a valorar sino es algo imprescindible y totalmente necesario para mejorar la calidad de vida del ser humano.

Considero que debe reforzarse la política de gobierno en todos sus niveles respecto al uso de las energías renovables y de manera específica la energía solar, otorgándose créditos a pequeños agricultores y regantes a fin de adquirir paneles fotovoltaicos y bombas solares en sus proyectos de elevación de agua para fines agrícolas, pecuario y de consumo humano.

CAPITULO 2: RECURSO HIDRICO SUBTERRÁNEO Y SOLAR DISPONIBLE EN LA CUENCA MOTUPE-OLMOS-LA LECHE

2.1.- UBICACIÓN

La zona de estudio de la Cuenca Motupe-Olmos-La Leche está conformada por los Distrito de Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope y Salas pertenecientes a la Provincia de Lambayeque y el Distrito de Pítipa perteneciente a la Provincia de Ferreñafe.

La ubicación geográfica de los Distrito mencionados se muestra en la Tabla N° 01

LOCALIDAD	COORDENADAS UTM (WGS-84)		M.S.N.M
	LATITUD SUR	MERIDIANO OESTE	
Motupe	6° 9' 3"	79° 43' 15"	130
Olmos	6° 3' 51"	80° 4' 23"	175
Pacora	6° 25' 14"	79° 56' 32"	53
Jayanca	6° 23' 44"	79° 49' 49"	61
Chochope	6° 7' 54"	79° 39' 26"	215
Pitipo	6° 33' 59"	79° 46' 51"	80
Salas	6° 16' 27"	79° 36' 35"	190

Tabla N° 01.- Ubicación geográfica de la Cuenca Motupe-Olmos-La Leche
Fuente: climate-data.org

Se observa que la zona en estudio está delimitada entre:

- latitudes sur 6° 3' 51" y 6° 33' 59", cuya diferencia angular le corresponde un arco de circunferencia de aproximadamente 0,5°.
- Meridianos oeste 79° 36' 35" y 80° 4' 23", cuya diferencia angular le corresponde un arco de circunferencia de aproximadamente 0,47°.

Los pequeños valores de arco de circunferencia de 0,5° y 0,47° para latitud y meridiano respectivamente permite considerar como una buena aproximación un valor único promedio para la irradiancia solar para los Distritos componentes de la Cuenca Motupe-Olmos-La Leche.

En la Tabla N° 02 se muestran los correspondientes datos de temperaturas máximas y mínimas promedio mensual, así como la temperatura promedio anual

LOCALIDAD	TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL (°C)				TEMP. PROM.ANUAL(°C)
	Tmax	Mes	Tmin	Mes	
Motupe	26,3	Febrero	21,3	Agosto	23,7
Olmos	26,4	Febrero	21,5	Agosto	23,9
Pacora	26,2	Febrero	20,2	Agosto	23,0
Jayanca	26,3	Febrero	20,4	Agosto	23,1
Chochope	26,1	Febrero	21,3	Agosto	23,6
Pitipo	26,0	Febrero	20,0	Agosto	22,8
Salas	26,2	Febrero	21,2	Agosto	23,5

Tabla N° 02.- Temperaturas promedios mensual y anual

Fuente: climate-data.org

Se observa que la temperatura máxima promedio mensual es de 26°C y ocurre en el mes de febrero, una temperatura mínima promedio mensual de 21°C y ocurre en el mes de agosto; asimismo se observa que la temperatura promedio anual es de 23°C. Estos valores se toman en cuenta cuando se considera el efecto de la temperatura sobre la tensión de operación del panel fotovoltaico.

2.2.- RECURSO HÍDRICO SUBTERRANEO DISPONIBLE EN LA CUENCA MOTUPE-OLMOS-LA LECHE

El recurso hídrico subterráneo disponible en la Cuenca Motupe-Olmos-La Leche es el conjunto de pozos tubulares y a tajo abierto proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAG), censados al 2014, el cual reporta un total de 4339 pozos. [6]

2.2.1.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, MEDICIONES Y VOLÚMENES DE EXPLOTACIÓN DE POZOS

La información recopilada comprende el estado situacional de cada pozo, así como las características técnicas que se indica a continuación:

- Coordenadas WGS-84
- Cota (msnm)
- Perforación: año, tipo, profundidad inicial, profundidad final, diámetro
- Equipo de bombeo: motor: tipo, HP; bomba: marca, tipo
- Niveles de agua y caudal: nivel estático, caudal, nivel dinámico
- Conductividad eléctrica (CE)
- pH
- STD: sólidos totales disueltos
- Explotación: estado del pozo, uso (doméstico, riego, industrial), régimen, volumen.

Respecto al estado situacional de cada pozo se consideran los siguientes estados: utilizado, utilizable, no utilizado, en perforación y no existe.

En la Tabla N° 03 que se indica a continuación muestra el total de pozos por localidad y su estado de uso.

ESTADO DE USO	LOCALIDAD							
	MOTUPE	OLMOS	PACORA	JAYANCA	CHOCHOPE	PITIPO	SALAS	TOTAL
UTILIZADO	751	752	121	565	165	126	147	2627
UTILIZABLE	243	455	119	141	81	18	61	1118
NO UTILIZADO	216	60	65	82	23	10	88	544
EN PERFORACIÓN	21	0	3	8	5	1	8	46
NO EXISTE	4	0	0	0	0	0	0	4
TOTAL	1235	1267	308	796	274	155	304	4339

Tabla N° 03.- Estado de uso de pozos por localidad

Fuente: elaboración propia en base a la información proporcionada por el MINAG (ANA) - censo 2014.

La explotación del recurso hídrico mediante bombeo solar también puede ser utilizado para el consumo humano, por lo que se hace necesario hacer un análisis de las propiedades organolépticas del referido recurso, i.e: el potencial de hidrógeno (pH) que caracteriza la acidez del agua, la conductividad eléctrica (CE) que caracteriza su dureza (muy blanda, blanda, ligeramente dura, moderadamente dura, dura y muy dura) y los sólidos totales disueltos (STD) que caracteriza el sabor de la misma, cuyos valores altos se traducen en sabor indeseable, amargo o metálico; también podría indicar la presencia de minerales tóxicos.

El DS N° 031-2010-SA de la Dirección General de Salud Ambiental-MINSA-2011 en su Reglamento de la Calidad del Agua Para Consumo Humano establece los siguientes Límites Máximos Permisibles (LMP).

- pH: $6,5 \leq \text{LMP} \leq 8,5$
- CE: $\leq 1,5 \text{ mmhos/cm}$
- STD: $\leq 1000 \text{ ppm}$

De la información proporcionada por el MINAG (ANA) -censo 2014 se puede observar que existe una relación directa entre el CE (mmhos/cm) y los STD (ppt), la misma que se indica a continuación:

$$\text{CE (mmhos/cm)} \approx 2 \text{ STD (ppt)},$$

En la Tabla N° 04 se muestra la cantidad de pozos indicando los valores de pH y CE de las aguas subterráneas en la zona de estudio. De aquí se puede deducir que la mayoría de los pozos tienen su pH normal, no afectando al ser humano cuyo pH es ligeramente básico (7,3 – 7,45). Con respecto a la conductividad eléctrica existe un porcentaje significativo que sobrepasa el límite máximo permisible y que el agua debe tratarse previo a su consumo.

LOCALIDAD	pH			CE (mmhos/cm)	
	Acido	Normal	Básico	$\leq 1,5$	$> 1,5$
Motupe	14	1216	5	827	408
Olmos	No hay datos registrados				
Pacora	1	306	1	201	107
Jayanca	17	775	4	591	205
Pitipo	2	152	1	113	42
Chochope	17	256	1	268	6
Salas	0	304	0	193	111

Tabla N° 04.- Número de pozos indicando valores de pH y CE

Fuente: elaboración propia en base a la información proporcionada por el MINAG (ANA) – censo 2014

Respecto a los parámetros hidráulicos de caudal (Q) y nivel dinámico (Hd) se cuenta con escasos datos registrados en relación al número total de pozos por localidad. Para efectos de diseño de bombeo solar clasifiqué el número de pozos para caudales menores y mayores a 10 l/s y niveles dinámicos menores y mayores a 10m.

En la Tabla N° 05 muestra el número de pozos con los valores indicados de caudal Q(l/s) y nivel dinámico Hd(m).

LOCALIDAD	Q (l/s)		Hd (m)	
	≤ 10	> 10	≤ 10	> 10
Motupe	266	240	11	35
Olmos	95	271	0	1
Pacora	63	20	2	1
Jayanca	40	50	0	74
Chochope	73	52	2	0
Pitipo	84	14	0	0
Salas	272	32	2	3

Tabla N° 05.- Número de pozos indicando valores de Q y Hd

Fuente: elaboración propia en base a la información proporcionada por el MINAG (ANA) – censo 2014

Preciso que, aparte del recurso hídrico diario requerido, los parámetros hidráulicos de caudal Q y nivel dinámico Hd, son fundamentales para determinar la potencia de diseño del sistema por bombeo solar, así como el dimensionamiento del panel fotovoltaico correspondiente.

2.3.- RECURSO SOLAR DISPONIBLE EN LA CUENCA MOTUPE-OLMOS-LA LECHE

El recurso solar disponible en la zona de estudio puede obtenerse de las siguientes maneras:

1.- Mapa Solar del Perú: aquí se indica que la zona en estudio (comprendida entre las latitudes 6,06° y 6,57° sur) registra alta disponibilidad de energía solar diaria, entre 5,5 a 6,0 Kwh/m².día en la costa norte (entre las latitudes 3° y 8° sur) y gran parte de la sierra sobre los 2500 msnm. Ver anexo N° 01.[4]

2.- NASA Surface Meteorology and Solar Energy RETSCREEN data: para esto se hace necesario introducir los valores de la latitud, longitud y msnm de la localidad de interés y se obtienen los valores de radiación normal directa promedio mensual en Kwh/m² día correspondiente a los últimos 22 años de registrados por satélites instalados en la atmósfera. Ver anexo N° 02.[5]

3.- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) – Dirección Zonal 2 en el Departamento de Lambayeque, cuenta con estaciones que registran datos en forma convencional y automatizados; entre otros parámetros climáticos registran valores de temperaturas máxima, mínima y promedio; no registrando datos de radiación solar. Se puede obtener valores estimados de radiación solar global media mensual a partir valores registrados de temperaturas máximas y mínimas; para esto se tiene que emplear modelos empíricos, los mismos que se detallan a continuación:

a.- $H/H_o = a + b (\Delta T_m/N)$, García (1994), citado por Evrendilek y Ertekin (1985)

b.- $H/H_o = a \Delta T_m^b$, Richardson (1985), citado por Liu y Scott (2001)

c.- $H/H_o = a \Delta T_m^{0,5}$, Hargreaves y Samani (1982)

d.- $H/H_o = a \Delta T_m^{0,5} + b$, Hargreaves et al (1985), citado por Evrendilek y Ertekin (1985)

e.- $H/H_o = a \ln (\Delta T_m) + b$, Chen et al.(2004)

f.- $H/H_o = 1 - \exp (-a \Delta T_m^b)$, Thornton y Running (1999)

g.- $H/H_o = a [1 - \exp (-b \Delta T_m^c)]$, Bristow y Campbell (1984)

h.- $H/H_o = a [1 - \exp (-b \Delta T_m^c/H_o)]$, Goodin et al. (1999)

i.- $H/H_o = 0,75 [1 - \exp (-b \Delta T_m^2/H_o)]$, Weiss et al. (2001)

j.- $H = [a \Delta T_m^c (H_o \tau)^c - d] / e$, Mahmood y Hubbard (2002), citado por Evrendilek y Ertekin (2002)

donde $\tau = 0,8 + 0,12 [(182-n)/183]^{1,5}$

k.- $H/H_o = a \Delta T_m + b$, modelo lineal

ΔT_m (°C) es la amplitud térmica media mensual; H (MJ/m²) la radiación diaria media mensual en superficie; H_o (MJ/m²) la radiación a tope de atmósfera definida para el día medio de cada mes (n); a, b, c, d, y e las constantes a ajustar cuyas dimensiones dependen del modelo considerado y N (h) el número de horas de sol.

Fuente: “Evaluación de distintos modelos de estimación de la radiación solar global basados en datos de temperatura”. C. Raichijk, A. Lanson. GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, Argentina.

4.- Instalando piranómetros térmicos o fotovoltaicos, también denominados solarímetros, los mismos que miden de manera precisa la intensidad de la radiación solar que incide sobre la tierra. Estos equipos son estandarizados de acuerdo a la Norma ISO 9060, que también es adoptada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

De las cuatro formas de obtener valores de la radiación solar directa en la zona de estudio he optado por la segunda, i.e, los datos obtenidos de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy RETSCREEN data.

En el anexo N° 02 se muestran los valores de radiación normal directa promedio mensual I(Kwh/m²/día) para las localidades de Motupe, Olmos, Pacora, Jayanca, Chochope, Pítipio y Salas.

En la Tabla N° 06 se muestran los valores máximos, mínimos y promedio anual, indicando el correspondiente mes de radiación solar (I).

LOCALIDAD	Imáx. (Kwh/m2/día)		Imín. (Kwh/m2/día)		Iave, anual (Kwh/m2/día)
	valor	mes	valor	mes	
Motupe	5,58	Nov.	4,33	Jul.	4,97
Olmos	7,03	Nov.	3,5	Ago.	5,38
Pacora	5,58	Nov.	4,33	Jul.	4,97
Jayanca	5,58	Nov.	4,33	Jul.	4,97
Chochope	5,59	Nov.	4,32	Jul.	4,96
Pitipo	5,57	Nov.	4,34	Jul.	4,97
Salas	5,58	Nov.	4,33	Jul.	4,97

Tabla N° 06.- Valores máximos y mínimos de radiación solar I

Fuente: elaboración propia en base a la información proporcionada por la NASA Surface Meteorology and Solar Energy RETSCREEN data.

De la Tabla N° 06 se observa que en el mes de noviembre se tiene el mayor nivel de radiación solar con un promedio global mensual de 5,8 Kwh/m²/día y que en el mes de

julio se tiene el correspondiente menor nivel de radiación solar cuyo valor es de 4,21 Kwh/m²/día. Se deduce también que 5,0 Kwh/m²/día es el valor promedio anual de la radiación solar en la zona de estudio.

Como se verá mas adelante, se considera como disponibilidad de radiación solar la del peor mes para el diseño de sistema por bombeo solar, i.e: se considerará el valor de 4,21 Kwh/m²/día correspondiente al mes de julio.

CAPITULO 3: INGENIERÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA MOTUPE-OLMOS-LA LECHE

3.1.- CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES

Para el diseño de un sistema solar fotovoltaico para la explotación aguas subterráneas se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones fundamentales:

- La carga hidráulica diaria requerida ($m^3/día$) para el mes más crítico, la misma que es obtenida teniendo en cuenta el consumo de agua tanto para riego, así como para la actividad pecuaria y consumo humano.
- La disponibilidad de la radiación solar directa promedio mensual ($Kwh/m^2/día$) en la zona de estudio.

Con los valores obtenidos de carga hidráulica y radiación solar disponible se procede al diseño y selección de los componentes del correspondiente Sistema Solar Fotovoltaico (SSF).

La Figura N° 01 muestra el diagrama de bloques para el bombeo solar de aguas subterráneas.

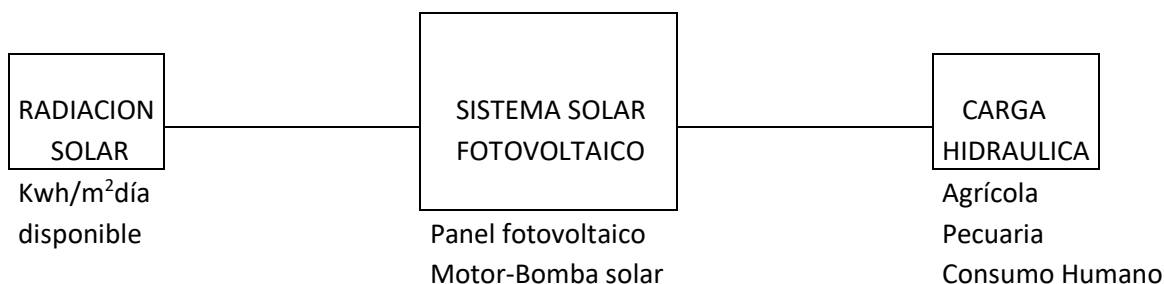


Figura N° 01 Diagrama de bloques para bombeo de aguas subterráneas.

Este sistema solar fotovoltaico experimenta una serie de transformaciones energéticas desde que la radiación solar incide sobre el panel solar hasta que la carga hidráulica es almacenada en el reservorio, a saber:

- En el panel solar: la energía solar se transforma en energía eléctrica de corriente continua.
- En el acoplamiento motor-bomba solar: la energía eléctrica se transforma en energía mecánica de rotación (cinética), ésta en energía hidráulica de bombeo de agua hacia el reservorio
- En el reservorio la energía hidráulica se convierte en energía potencial (almacenamiento).

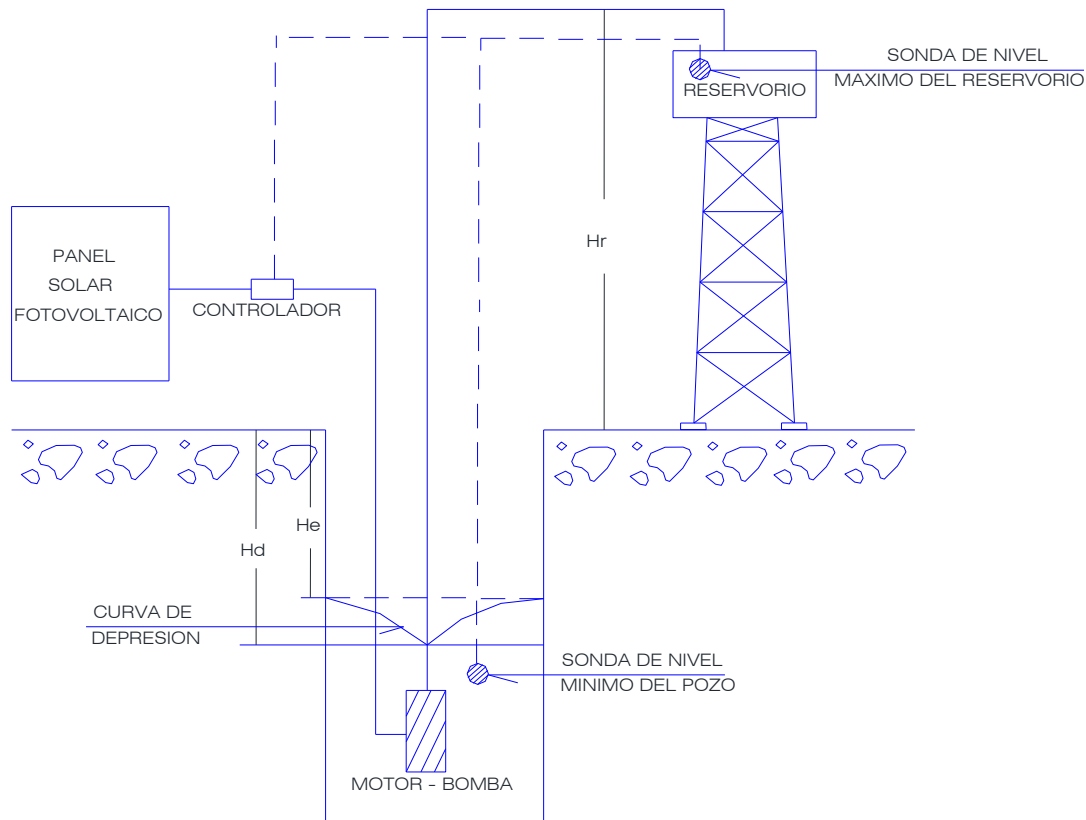


Figura N° 02 Diagrama del sistema de bombeo solar directo

En este proceso de transformación se producen pérdidas energéticas tanto en sus componentes como en su conexionado.

Las pérdidas energéticas en sus componentes: panel solar, motor eléctrico y bomba solar quedan cuantificadas por sus correspondientes eficiencias (η).

Las pérdidas por conexionado son de carácter eléctrico e hidráulico. Las pérdidas eléctricas se generan en el cable de comunicación entre el panel solar y el motor eléctrico y las pérdidas hidráulicas en el sistema de tuberías y accesorios entre la bomba solar y el reservorio. Las pérdidas eléctricas se deben considerar en la energía eléctrica del motor y el de las pérdidas hidráulicas en la energía para activar la bomba solar.

Si se considera las siguientes energías:

- E_h : energía requerida para disponer el recurso hídrico en el reservorio, bombeando hasta una altura total H_t a un caudal Q_h .
- E_b : la energía requerida para activar la bomba solar, la misma que tiene una eficiencia de η_b .
- E_m : la energía necesaria para activar el motor eléctrico, cuya eficiencia es η_m
- E_s : la energía solar disponible en la zona de bombeo captada por el panel solar que tiene una eficiencia total de η_s .

Entonces. la relación que existe entre éstas son las que se indican a continuación:

$$E_b = E_h / \eta_b \dots\dots\dots(1)$$

$$E_m = E_b / \eta_m \dots\dots\dots(2)$$

$$E_s = E_m / \eta_s \dots\dots\dots(3)$$

Por tanto se tiene que:

$$E_s = (E_h / \eta_s \eta_m \eta_b) \dots\dots\dots(4)$$

Es la ecuación fundamental que relaciona la energía hidráulica de bombeo requerida en función de la energía solar disponible en el lugar de bombeo.

A diferencia de la explotación de aguas subterráneas empleando grupos diesel, cuyas potencias eléctricas están sobredimensionadas, bombeando caudales excesivos para satisfacer la demanda hídrica agrícola, generándose en algunos casos el agotamiento hídrico del pozo, se tiene como alternativa el bombeo solar, considerado como el bombeo de bajos caudales, en el cual se aprovecha al máximo el recurso solar y el bombeo solar necesario, racional y sostenible para el fin propuesto; por estas razones al diseño de un sistema solar fotovoltaico se le considera como un traje hecho a la medida, i.e: sin sobredimensionamiento.

3.2.- DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA, PÉRDIDAS Y ALTURA TOTAL DE CARGA

3.2.1.- DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA

Uno de los primeros pasos para el diseño de un sistema por bombeo solar es determinar la demanda diaria de agua correspondiente al mes más crítico V_h ($m^3/día$); para esto se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Extensión agrícola (Ha)
- Tipo de cultivo
- Requerimiento hídrico según tipo de cultivo (Lt/Ha/día)
- Requerimiento hídrico pecuario (cantidad y especie de animales) y humano (Lt/día)
- Tipo de riego (goteo, aspersión o gravedad)

Adicionalmente a la demanda diaria se hace necesario considerar un volumen de reserva, el mismo que queda a criterio del usuario. Considerando la demanda diaria total se establecen las dimensiones del reservorio.

La energía hidráulica requerida para disponer el recurso hídrico en el reservorio se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$E_h = \rho g V_h H_t \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

E_h : es la energía hidráulica requerida (Watt-s/día)

ρ : es la densidad del agua (1000 Kg/m³)

g : es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

V_h : es la demanda diaria para el mes más crítico (m³/día)

H_t : es la altura total de bombeo incluyendo las correspondiente pérdidas hidráulicas (m).

3.2.2.- DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS HIDRÁULICAS

Las pérdidas hidráulicas (H_{perd}) en el sistema de bombeo solar se producen en la tubería (pérdidas primarias) y accesorios (pérdidas secundarias) instalados en el tramo de impulsión comprendido entre la bomba y el reservorio, cuya cuantificación depende de factores geométricos y físicos.

Los factores geométricos considerados son:

- Longitud de la tubería (L)
- Diámetro de la tubería (D)

Los factores físicos considerados son:

- Tipo de flujo: laminar o turbulento
- Velocidad (V)
- Densidad (ρ)
- Viscosidad (μ), parámetro sensible que depende de la temperatura de trabajo del fluido
- Rugosidad relativa (ϵ), que depende de la naturaleza del material de la tubería y de su diámetro
- Tipo de accesorios de acoplamiento (válvulas, codos)

El tipo de flujo queda determinado por el valor numérico del número de Reynolds (Re) al aplicar la siguiente ecuación:

$$Re = \rho V D / \mu \dots\dots (6)$$

En el Anexo N° 03 se muestra la gráfica para obtener el valor numérico de la viscosidad μ a la temperatura de trabajo del agua.

Entonces:

- Si $Re \leq 2000$, el flujo es laminar
- Si $Re \geq 4000$, el flujo es turbulento

En general, las pérdidas hidráulicas primarias (H_p) se obtienen aplicando la ecuación universal de Darcy – Weisbach, establecida de la siguiente manera:

$$H_p = f (L/D) V^2 / 2g \dots\dots(7)$$

Donde f es el factor de fricción, cuyo valor numérico depende del tipo de flujo.

Si el flujo es laminar, el factor de fricción se determina aplicando la Ley de Poiseuille:

$$f = 64 / Re \dots\dots(8)$$

Si el flujo es turbulento, el factor de fricción se obtiene empleando el Diagrama de Moody, conociendo previamente el valor numérico del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería empleada. En el Anexo N° 04 se muestra el Diagrama de Moody.

Las pérdidas hidráulicas secundarias (H_s) que se generan en los accesorios de acoplamiento de las tuberías (válvulas, codos) son mínimas con respecto a las pérdidas hidráulicas primarias y que con buen criterio técnico se puede estimar en un 10% de éstas, i.e: $H_s = 0,10 H_p$.

En consecuencia se tiene que:

$$H_{\text{perd.}} = H_p + H_s = 1,1 H_p \dots\dots (9)$$

3.2.3.- DETERMINACIÓN DE LA ALTURA TOTAL DE CARGA

Teniendo en consideración las alturas establecidas en la Fig. N° 02, la altura total de carga hidráulica H_t queda determinada mediante la siguiente ecuación:

$$H_t = H_d + H_r + H_{\text{perd.}} = H_d + H_r + 1,1 H_p \dots\dots (10)$$

Ecuación que debe ser considerada para determinar la potencia del conjunto motor-bomba.

3.3.-SELECCIÓN DEL SISTEMA MOTOR-BOMBA SOLAR Y SU CONFIGURACIÓN EN EL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Habiéndose determinado el recurso hídrico diario $V(\text{m}^3/\text{día})$ y la altura total de carga H_t (m), se procede a la selección del equipo motor-bomba solar y su correspondiente configuración en el sistema solar fotovoltaico.

3.3.1.- SELECCIÓN DE LA BOMBA SOLAR

La selección del tipo de bomba solar a instalar es de suma importancia, pues cada modelo tiene un rango óptimo de operación, son diseñadas para trabajar efectivamente durante bajas condiciones de radiación, a voltajes reducidos, sin estancamiento ni sobrecalentamiento.

La bomba solar se selecciona sobre la base de la demanda que debe satisfacer y la capacidad del pozo para producir agua, no es posible extraer mas agua que la cantidad determinada para su rendimiento máximo; emplear un régimen de bombeo más bajo durante un mayor número de horas de operación y la capacidad de almacenamiento menor de manera ininterrumpida.

La clasificación de las bombas solares se hace en base a su principio mecánico de accionamiento; las mismas que son de dos tipos: centrífugas y volumétricas.

Las bombas centrífugas pueden ser sumergibles de multipaso, de succión superficial y flotantes.

Las bombas volumétricas pueden ser de desplazamiento positivo de pistón y de diafragma.

En la Fig. N° 03 se indican los tipos de bombas solares expresadas líneas arriba.

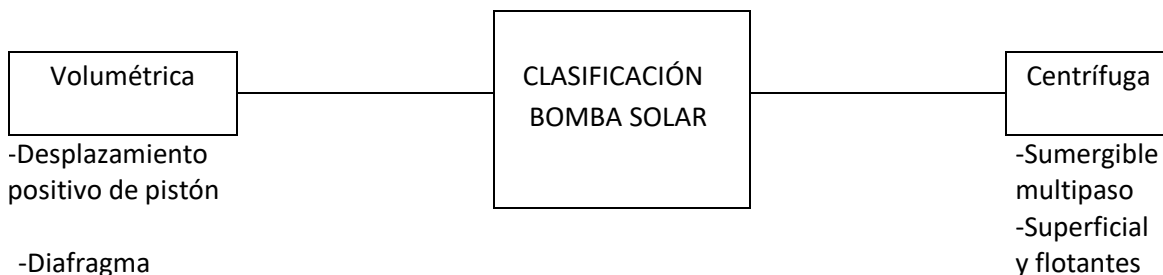


Fig. N° 03 Clasificación de las bombas solares según su principio mecánico de accionamiento.

Cada tipo de bomba trabaja dentro de un rango de recurso hídrico diario V_h y una altura total de carga hidráulica H_t . La figura N° 04 muestra sus rangos de operación.[7]

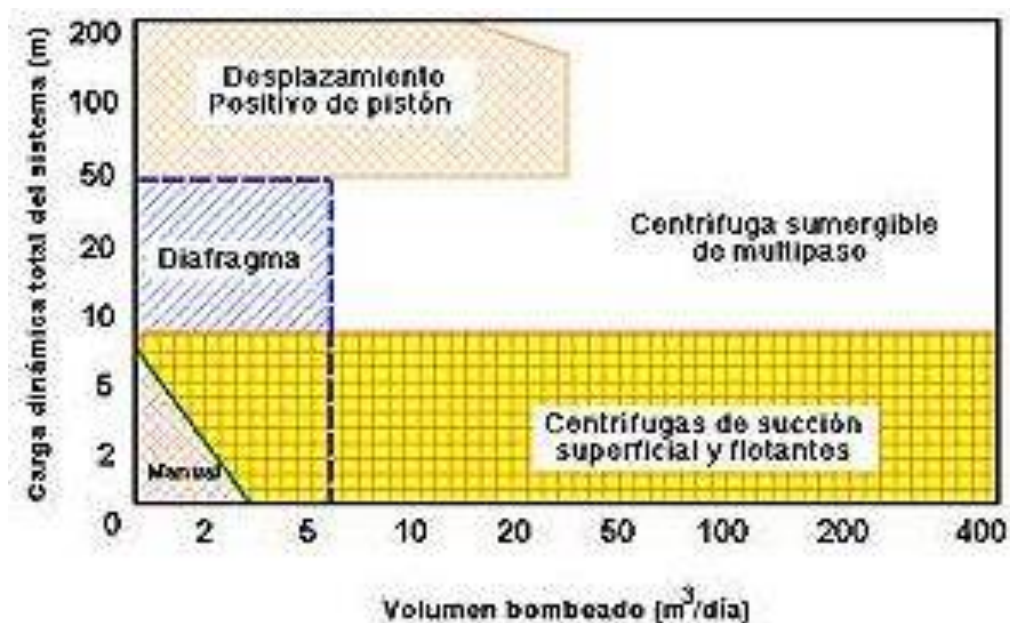


Fig. N° 04 Zonas de traslape entre carga hidráulica y volumen donde se aplica los diferentes tipos de bombas solares.

Analizando la Fig. N° 04 se puede expresar lo siguiente:

- Las bombas centrífugas de superficie pueden trabajar como máximo a una profundidad de succión de 8m y pueden bombear grandes caudales.
- Las bombas de desplazamiento positivo pueden trabajar a bajos caudales y grandes profundidades, son más eficientes que las de diafragma, que bombean menos volumen y a menos profundidad.
- Las bombas sumergibles de multipaso tienen un mayor rango de volumen de bombeo y profundidad que las bombas centrífugas de succión superficial y flotantes.
- Las bombas centrífugas proporcionan en general un caudal mayor que las de desplazamiento positivo.

Estas distintas clases de bombas presentan ciertas ventajas y desventajas, las mismas que se indican en la Tabla N° 07.

Bombas	Ventajas	Desventajas
Centrífugas sumergibles	Comúnmente disponible Toleran un poco de arena Utilizan agua como lubricante Manejan flujos altos	Rango de eficiencia estrecho respecto a la carga. Se extraen para mantenimiento. Desgaste acelerado en fuentes corrosivas.
Centrífugas de succión superficial	Comúnmente disponible Toleran un poco de arena Utilizan agua como lubricante Manejan flujos altos No pueden succionar mas de 8m.	Rango de eficiencia estrecho respecto a la carga. Se dañan por congelamiento. Desgaste acelerado en fuentes corrosivas.
Desplazamiento positivo	Soportan cargas muy grandes. Producción variable ajustando la carrera.	Reemplazo de sellos del pistón. No toleran arenas o sedimentos. Extracción de pistón y cilindro del pozo para reparar los sellos. No dan grandes flujos.
Diafragma	Operan a cargas menores de 40m. Muy económicas.	No toleran arena o sedimentos. No trabajan a cargas grandes. Bajos flujos.

Tabla N° 07. Principales características de las bombas fotovoltaicas

Fuente: M. Ibañez Plana, *et.al.* Tecnología Solar-tabla 12.3, pág. 421

Con los criterios indicados líneas arriba, se selecciona el tipo de bomba solar a instalar, el cual es particularizado para cada usuario de acuerdo a su requerimiento hídrico y nivel de bombeo de agua.

No toda la energía mecánica que recibe la bomba solar se transforma en energía hidráulica, es decir tiene su propia eficiencia η_b , cuyo rendimiento diario varía con la altura dinámica total, la insolación solar y el tipo de bomba. Para obtener el valor de su eficiencia se debe recurrir a los datos técnicos del fabricante para el tipo de bomba seleccionado, sin embargo se puede tomar como alternativa valores de eficiencia promedio las que se indican en la Tabla N° 08 que se muestra a continuación.

Carga dinámica total (m)	Tipo sistema de bombeo	Eficiencia (%)
5	Centrífuga de superficie	25
20	Centrífuga de superficie	15
20	Centrífuga sumergible	25
20 a 100	Centrífuga paso múltiple	35
0 hasta 100	Desplazamiento positivo	35
Mas de 100	Desplaz. positivo palanca	45

Tabla N° 08.- Valores promedio de eficiencia de bomba solar según su tipo y carga dinámica total.

Fuente: Dr. Aarón Sánchez Juárez. Sistemas fotovoltaicos: iluminación y bombeo. Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). España, Junio 2009. [10]

El caudal de bombeo Q_b (m^3/Hr) se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_b = V_h / HSP \dots\dots\dots(11)$$

Siendo HSP la hora solar pico diaria de radiación solar disponible en la zona de interés. El valor numérico de la HSP es igual al valor numérico de la energía solar expresada en $Kw-h/m^2$ día correspondiente al mes más crítico.

La correspondiente energía E_b que requiere la bomba queda determinada por la ecuación

$$E_b = E_h / \eta_b \dots\dots\dots(12)$$

Donde E_h es obtenida de la ecuación N° (5)

3.3.2.- SELECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

El motor eléctrico es la máquina que se acopla a la bomba solar y que de su accionar conjunto permite de manera óptima la transformación de la energía solar en energía hidráulica disponible en el reservorio. En este proceso de transformación energética se generan pérdidas, las mismas que quedan cuantificadas si se conocen los valores de sus correspondientes eficiencias.

Los motores eléctricos utilizados para bombeo solar son:

- De corriente continua (CC) de imanes permanentes: con escobillas, sencillos, eficientes para bajas potencias, no necesita circuito de control, muy caros a altas potencias. La desventaja de este motor es que no puede operar directamente en bombas sumergibles.

- De corriente continua (CC) bobinado: sin escobillas (brushless), alta eficiencia mecánica, bajo mantenimiento, con mecanismo electrónico que sustituye a las escobillas, lo que constituye una desventaja pues significa un gasto extra y riesgos adicionales de averías.
- Corriente alterna (CA), mayor disponibilidad en el mercado y rango mas amplio de aplicaciones, son más baratos que los motores de CC, requieren de un inversor de CC/CA , son menos eficientes que los motores de CC debido a las pérdidas de conversión, pueden funcionar por muchos mas años con menos mantenimiento que los motores de CC.

La selección del motor eléctrico según la potencia P de generación en el sistema fotovoltaico se hace de acuerdo a los siguientes rangos:

- Para $P < 3$ HP, se utilizan motores de CC de imanes permanentes
- Para $3 \leq P \leq 10$ HP, se utilizan motores de CC con bobina en el rotor
- Para $P > 10$ HP, se utilizan motores de corriente alterna con inversor

No toda la energía fotovoltaica que recibe el motor eléctrico se transforma en energía mecánica de rotación, es decir tiene su propia eficiencia η_m , cuyo valor depende de su potencia, porcentaje de carga de operación y de su velocidad de giro. En este contexto al igual que la bomba solar se debe recurrir a los datos técnicos del fabricante para el tipo de motor eléctrico seleccionado y obtener el valor de su eficiencia. Sin embargo se puede manifestar que la eficiencia para motores eléctricos en general está comprendido entre el rango de 0,7 a 0.95 de su potencia nominal.

La correspondiente energía E_m que requiere el motor eléctrico para desarrollar la potencia P correspondiente a la energía E_b queda determinada por la ecuación:

$$E_m = E_b / \eta_m \dots\dots\dots(13)$$

3.3.3.- CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA MOTOR-BOMBA SOLAR

La configuración o acoplamiento del sistema motor-bomba solar son diversas, dependiendo de las características de bombeo y de la potencia de generación.

Con respecto a las características de bombeo, las más usadas son las que se indican a continuación:

- Conjunto motor-bomba sumergido: es el más habitual en bombeos solares para suministro de agua de boca. Es fácil su instalación a menudo con tubería flexible, dispositivo de bombeo alejado de potenciales daños.
- Bomba sumergida con motor en superficie: de mantenimiento fácil para el motor de imanes permanentes por la accesibilidad para el cambio de las escobillas.
- Conjunto motor-bomba en superficie: configuración que sólo permite bombear agua a una profundidad máxima de 8m.
- Conjunto motor-bomba flotante: la versatilidad de esta configuración es ideal para el bombeo de riego de canales y pozos abiertos.

Con respecto a la potencia de generación existen tres conjuntos de acoplamiento motor-bomba:

- Sistemas de baja potencia (50 a 400 Wp). Se acopla un motor de CC a una bomba de desplazamiento positivo (de membrana). Se instala un convertidor CC/CC entre el panel fotovoltaico y el motor para mejorar su acoplamiento.
- Sistemas de media potencia (400 a 1500 Wp). Puede acoplarse un motor asíncrono accionado por un inversor de frecuencia variable con una bomba centrífuga sumergible multietapa o un motor de CC sin escobillas acoplado a una bomba de desplazamiento positivo helicoidal.
- Sistemas para altas potencias (mayores a 1500 Wp). Puede acoplarse un motor asíncrono o de inducción accionado por un convertidor de frecuencia industrial con una bomba centrífuga sumergible multietapa.

3.4.-DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO Y ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA

Los paneles solares son fabricados con material semiconductor de silicio cristalino por las siguientes razones:

- Es el segundo material más abundante que existe en la naturaleza, después del aire.
- Debido a su estructura cristalina y enlace covalente es un material muy sensible a la generación de energía eléctrica al ser expuesta como celda a la luz visible de la radiación solar.

El átomo de silicio tiene una energía de ionización de $E_b = 1,12 \text{ eV}$ y de acuerdo a la teoría de bandas de energía que se estudia en la Física del Estado Sólido tiene un gap de energía (ancho de la banda prohibida) de $E_g = 1,12 \text{ eV}$.

La figura N° 05 muestra el esquema de las bandas de energía de un semiconductor, E_c es la energía que requiere un electrón ubicado en la banda de valencia para que genere corriente eléctrica en la banda de conducción. Para el caso del átomo de silicio se tiene:

$$E_c = E_b + E_g = 2,24 \text{ eV} \dots\dots\dots(14)$$

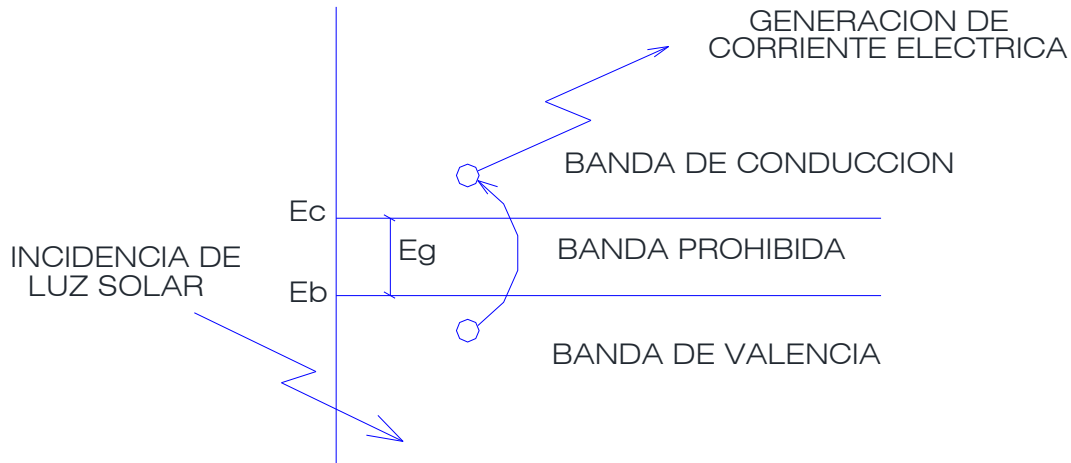


Fig. N° 05 Diagrama de bandas de energía de un material semiconductor.

Por otro lado, la disponibilidad de radiación solar promedio en la zona de estudio es de 5 Kw-h /m² día, equivalente a $11,25 \times 10^9$ eV/m² día, el cual resulta en $1,23 \times 10^9$ veces el valor de E_c , justificándose de esta manera la alta sensibilidad que tienen los paneles solares fabricados de silicio para generar energía eléctrica cuando son expuestos a la luz solar.

Hay diversas consideraciones que hay que tener en cuenta para el dimensionamiento del generador fotovoltaico o panel solar fotovoltaico, las mismas que se detallan a continuación:

- Demanda diaria de agua para el mes más crítico, el mismo que corresponde al mes de mayor consumo del recurso hídrico.
- Energía solar disponible en la zona de interés, el mismo que corresponde para el mes de más baja radiación solar.
- La orientación del generador fotovoltaico teniendo en cuenta la latitud de la zona de estudio. Esto permite captar de manera óptima el recurso solar disponible para poder convertirla en energía eléctrica.
- Las curvas características del generador fotovoltaico, las mismas que son proporcionadas por el fabricante.
- La eficiencia del panel solar fotovoltaico, la cual es afectada por la temperatura ambiente. Debe también considerarse las pérdidas que se generan en los cables de comunicación entre el panel y el motor eléctrico.
- El arreglo fotovoltaico, es decir la composición serie-paralelo de las celdas solares individuales que permitan generar la energía eléctrica a una determinada corriente y voltaje de operación, acorde con las características eléctricas del motor seleccionado. Este arreglo fotovoltaico debe ser dimensionado como un “traje a la medida”, es decir el necesario para evitar por un lado costos excesivos de suministro de equipos e instalación y por otro lado optimizar el recurso solar justo para satisfacer la demanda hídrica, a diferencia de lo que ocurre con el bombeo de agua mediante la quema de combustibles fósiles.

Como se ha indicado en el cuadro N° 01, la Cuenca Motupe-Olmos-La Leche, tiene latitudes comprendidas entre 6° 3' 51" (Olmos) y 6° 33' 59" (Pitipo) hemisferio sur. Los fabricantes de paneles solares recomiendan que la inclinación Φ que éstos deben tener para captar el máximo recurso solar debe cumplir la siguiente relación.

$$\Phi = L + 10^\circ \dots\dots(14)$$

Donde L es la latitud del lugar.

Para nuestro caso, se puede considerar una inclinación del generador fotovoltaico de $\Phi = 16^\circ$.

Las curvas características del generador fotovoltaico se detallan en las figuras N° 06, 07 y 08

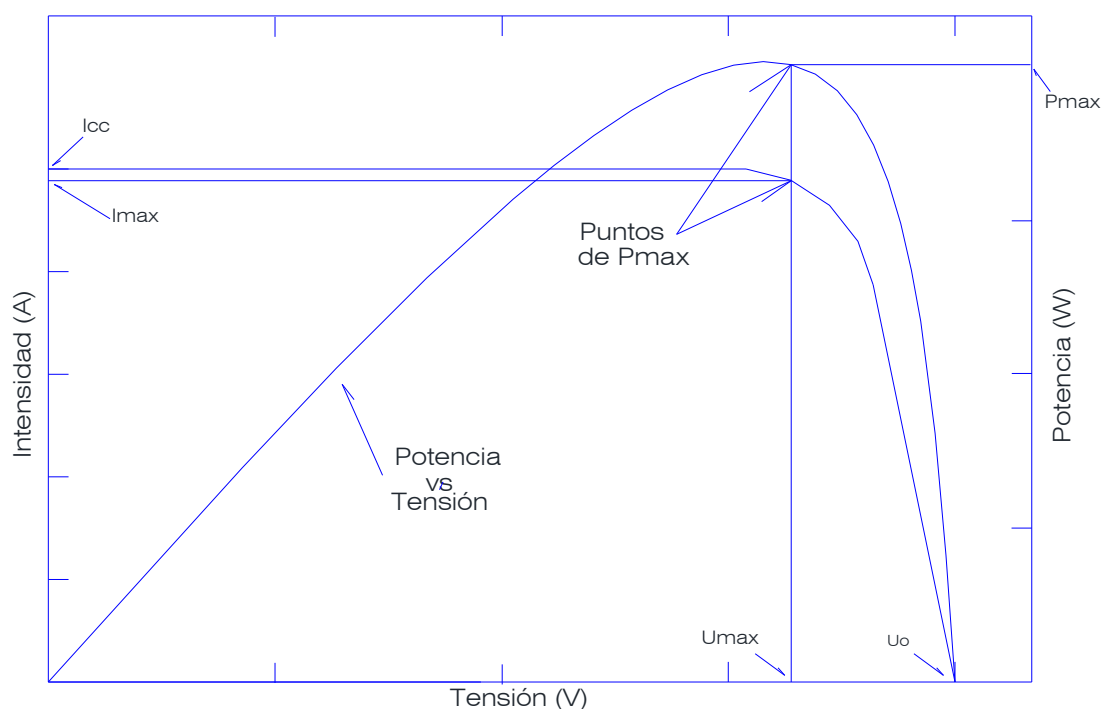


Fig. N° 06 curvas características de un panel solar fotovoltaico:
Intensidad vs Tensión y Potencia vs Tensión

Fuente: M. Castro, *et. al.* Sistemas de Bombeo Eólicos y Fotovoltaicos. PROGENSA, 2da. Edición 2011, España, Pág. 55. [1]

En la Fig. N° 06 se observa como valores característicos del panel solar a la intensidad de corto circuito I_c , tensión de circuito abierto U_o y potencia máxima P_{max} (capacidad nominal de operación, denominada también como potencia pico). El par ordenado (U, I) corresponde para cualquier condición real de operación.

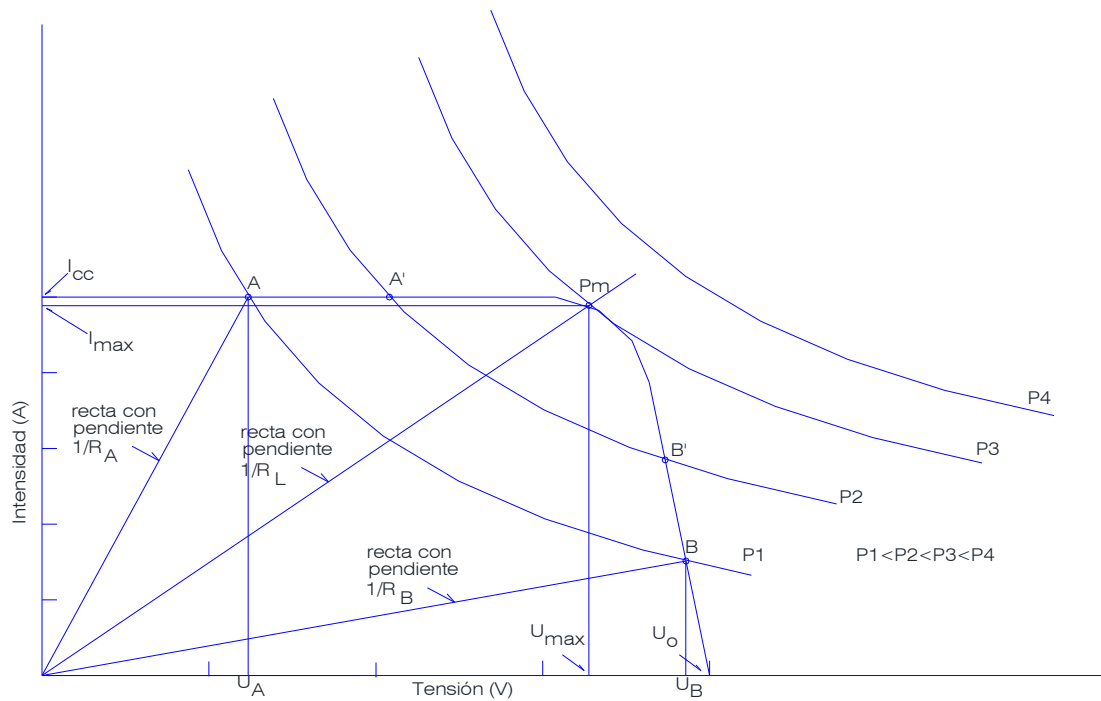


Fig. N° 07 Curvas equipotenciales que cortan la curva Intensidad vs Tensión
 Fuente: Aarón Sánchez Juárez, *et. al.* Sistemas Fotovoltaicos Iluminación y Bombeo.
 ANES. Junio 2009, Fig. 11(b), Pág. 46. [10]

En la Fig. N° 07 se observa un conjunto de curvas equipotenciales. Por ejemplo para P1, el sistema tiene dos posibilidades de funcionamiento, una para el punto A, en donde la carga tiene una resistencia R_A y la otra el punto B, con resistencia de carga R_B , del cual se deduce que es preferible que funcione en el punto B a mayor tensión y menor corriente con respecto al punto A que le corresponde menor tensión y mayor corriente, puesto que a menor corriente se tiene menores pérdidas por efecto joule en los conductores eléctricos que se conectan entre el panel fotovoltaico y el motor eléctrico, mejorando la eficiencia del panel fotovoltaico; sin embargo esta eficiencia es menor con respecto a la equipotencial P3 en donde el sistema tiene su potencia máxima de funcionamiento.

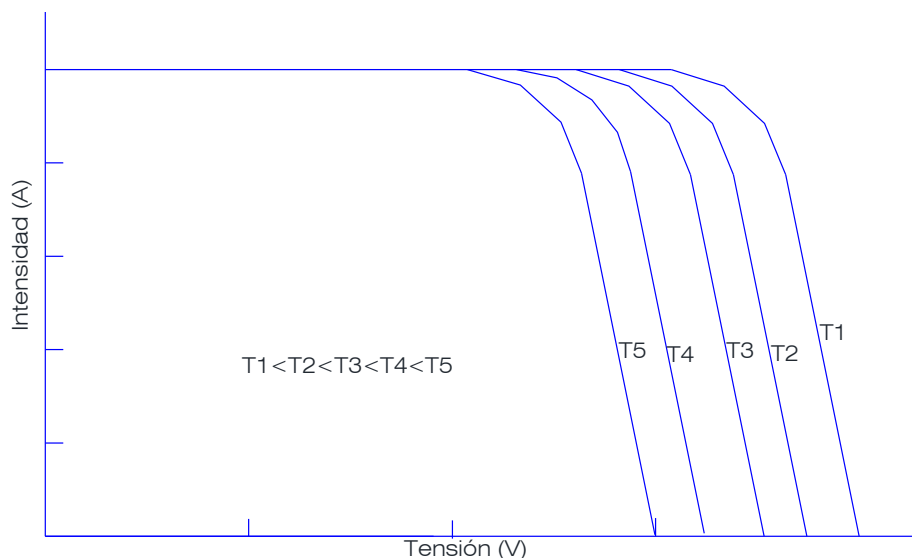


Fig. N° 08 Efecto de la temperatura sobre los parámetros eléctricos del panel fotovoltaico

La temperatura del medio ambiente afecta a los parámetros eléctricos I, U y P del panel fotovoltaico y por ende su eficiencia.

Cuando la temperatura del medio ambiente T_a se incrementa, se genera un ligero incremento en la corriente eléctrica y una disminución en la tensión o voltaje, potencia y por ende también en una disminución de su eficiencia, tal como se indica en la Fig. N° 08.

La eficiencia de un panel fotovoltaico generalmente se mide en condiciones de prueba estándar (STC), es decir a una incidencia normal de 1000 W/m^2 , distribución espectral AM 1,5 y temperatura de célula de 25°C . Otro valor importante proporcionado por el fabricante es la temperatura normal de operación de la celda solar (TONC), la misma que oscila entre 43°C y 49°C , cuando no se dispone de éste dato se puede tomar el valor de 45°C . [9]

Con la información indicada líneas arriba, se determina la temperatura de la celda fotovoltaica T_c y la eficiencia de la celda solar η_T por efecto de la temperatura. Las ecuaciones a utilizar son las que se indican a continuación:

$$T_c = T_a + G(\text{TONC} - 25)/1000 \dots\dots\dots(15)$$

$$\eta_T = 1 - 0,0048 (T_c - T_a) \dots\dots\dots(16)$$

Siendo G la irradiancia solar en la zona de interés.

En la Tabla N° 09 muestra los valores y efectos que produce la variación de la temperatura sobre los parámetros eléctricos y la eficiencia de un panel fotovoltaico.

Parámetro	Símbolo	Efecto	Valor
Corriente cortocircuito	dI_{cc}/dT	aumenta	10-30 $\mu A/cm^2$ $^{\circ}C$
Tensión circuito abierto	dV_{oc}/dT	disminuye	2,0-2,4 mV/ $^{\circ}C$
Potencia	dP/dT	disminuye	0,4 %/ $^{\circ}C$
Eficiencia	$d\eta/dT$	disminuye	0,4 %/ $^{\circ}C$

Tabla N° 09.- Efecto de la variación de la temperatura sobre los parámetros de un panel fotovoltaico.

Fuente: Dr. Aarón Sánchez Juárez. Sistemas fotovoltaicos: iluminación y bombeo. Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). España, Junio 2009. Tabla N° 8, Pag. 51.

La eficiencia del panel fotovoltaico η_s no es igual a la eficiencia de la celda solar η_T , generalmente es de 1 a 3% inferior a ésta. Los conductores eléctricos que se conectan entre el panel fotovoltaico y el motor eléctrico, que son de cobre electrolítico de 99,9% de pureza, tienen una eficiencia η_{CE} elevada, del orden del 0.99, de manera que η_s se obtiene de la ecuación:

$$\eta_s = (1 - K) \eta_T \eta_{CE} \dots\dots\dots(17)$$

donde K toma valores de 1 al 3%. El valor de η_s es la que debe considerarse en la ecuación (4).

Con la finalidad de acondicionar la potencia requerida teniendo en cuenta la disponibilidad del recurso solar en la zona de estudio, se hace necesario efectuar un arreglo fotovoltaico que permita satisfacer la demanda energética solicitada.

A continuación se muestra un arreglo fotovoltaico típico cuyo número de celdas y disposición depende del consumo de energía requerido y el voltaje de salida que debe ser el mismo que el del motor eléctrico seleccionado.

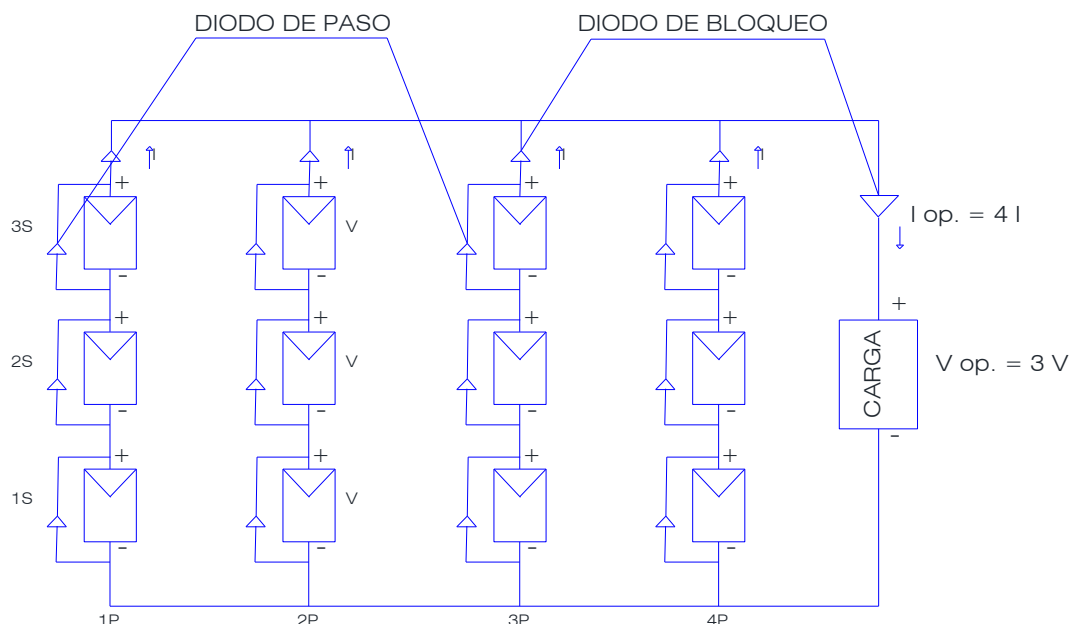


Fig. N° 09 Celdas solares conformando un arreglo fotovoltaico en configuración 3Sx4P

En la Fig.09 se puede observar que la configuración serie permite determinar el voltaje de operación de la carga y la configuración paralelo determina la corriente necesaria que consumirá la misma.

Por otro lado se observan dos tipos de diodos: un diodo de paso que impide que en la celda solar la corriente fluya en sentido inverso, originando un calentamiento en la misma y su posterior deterioro; el otro diodo es el de bloqueo que permite proteger a la carga contra sobre tensiones.

En estas condiciones, el sistema solar fotovoltaico como un conjunto técnicamente diseñado permitirá satisfacer la demanda energética que se requerirá teniendo en cuenta la demanda hídrica y las características particulares del pozo cuyas aguas subterráneas se van a explotar.

CAPITULO 4: IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS QUE SE GENERAN MEDIANTE BOMBEO CON COMBUSTIBLES FOSILES Y BOMBEO SOLAR

4.1.- IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS QUE SE GENERAN MEDIANTE BOMBEO CON COMBUSTIBLES FOSILES

El uso de combustibles fósiles (gasóleo o diesel y gasolina) para el funcionamiento de los grupos electrógenos para la explotación de las aguas subterráneas generan en su entorno impactos ambientales negativos tanto a la atmósfera como a las personas, animales y plantas.

Con respecto a los impactos ambientales negativos sobre la atmósfera se considera el ruido que producen los grupos electrógenos cuando están funcionando y que por su naturaleza constructiva, estos generan niveles acústicos por encima de los 80 dBA, el cual está por encima del límite máximo permisible para zona industrial según se establece en el DS N° 085-2003-PCM (ECA-RUIDO), generando riesgo auditivo a las personas ubicadas en el entorno de éstos.

Otro aspecto significativo de impacto ambiental negativo es la contaminación atmosférica que se genera debido a los gases de combustión y material particulado que emanan a través de sus tubos de escape.

Para el caso del gasoil o diesel, los principales gases residuales son el CO₂, NO_x, vapor de agua, SO_x y la presencia de CO y material particulado cuando la combustión es incompleta.

En la quema de la gasolina, los gases contaminantes emanados son el CO (gas que aparece por la falta de oxígeno en la combustión), HC, NO_x, Pb.

Por otro lado, se tiene también la formación del “smog fotoquímico” el mismo que se forma en la atmósfera con la combinación de los HC, NO_x y la radiación ultravioleta (UV).

En esta parte del trabajo de investigación es interesante determinar cuanto CO₂ se genera en la atmósfera circundante por la quema de un galón de combustible fósil, dado que este gas es uno de los principales causantes del efecto invernadero.

El diesel o gasoil tiene una densidad que oscila entre el 0,75 a 0.95 Kg/l y un contenido de carbón entre 84 y 87 %; para nuestro interés y fines de cálculos consideramos valores promedios de 0,85 Kg/l para la densidad y de 85,55 % como contenido de carbono. Entonces:

$$1\text{litro de diesel contiene: } 0,85 \times 0,855 = 0,727 \text{ Kg de carbono}$$

$$\text{Masa de CO}_2 = 12 + 16 \times 2 = 44 \text{ Kg}$$

Para 0,727 Kg de carbono se requerirá $0,727 \times 32/12 = 1,939$ Kg de oxígeno.

Por tanto cuando se quema 1 litro de diesel o gasoil se produce en la atmósfera 2,666 kg de CO₂ ó equivalentemente a 10,13 Kg de CO₂ /galón de diesel.

De manera similar se obtiene una generación de 9,00 Kg de CO₂ cuando se quema un galón de gasolina, considerando una densidad promedio de 0,76 Kg/l y un contenido promedio de 85% de carbono.

El volumen de producción de CO₂ por quema de combustibles fósiles dependerá de la cantidad de galones que se necesitan cotidianamente, la misma que va en proporción directa con la magnitud del recurso hídrico que requiere un usuario de manera específica.

De lo manifestado, se precisa que la generación de CO₂, el “smog fotoquímico” y material particulado en forma de carbón (debido a la combustión incompleta) están contribuyendo a la contaminación atmosférica, amén de la contaminación sonora cuando el generador está funcionando y la contaminación de suelos por el eventual caso de derrame del combustible en la zona de interés.

Con respecto a la salud humana, los gases residuales emanados a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles producen efectos negativos, a saber:

- El CO causa daño al ligarse con la hemoglobina de la sangre, formando carboxihemoglobina (COHb), se une a la hemoglobina aproximadamente 220 veces con mayor intensidad que el oxígeno, de modo que pequeñas cantidades de este gas en el aire que se respira puede hacer que cantidades significativas de la hemoglobina se ligen como COHb. La hemoglobina así ligada no puede desempeñar su función normal, la de transportar oxígeno en la sangre (como oxihemoglobina O₂Hb). En este escenario, los efectos sobre la salud son: decremento en la función cardíaca, deterioro visual, dolores de cabeza, náuseas, vómitos, dificultad en la respiración; todo esto depende del porcentaje de concentración en la sangre.
- Los HC que contienen benceno producen irritación a la piel y ojos, a los conductos respiratorios, mareos, náuseas, dolores de cabeza y causante del cáncer.
- Los NO_x formado por la combinación del NO y NO₂; el NO es relativamente inofensivo, el NO₂ es tóxico e irritante, afectando a la piel, tracto respiratorio y mucosa nasal.
- El CO₂ produce asfixia, causa hiperventilación. La exposición a largo plazo es peligrosa, asfixiante a grandes concentraciones.
- El SO_x conformado por SO₃ y SO₂, el SO₂ es irritante y tóxico, afecta las mucosidades y pulmones provocando ataques de tos.
- El smog fotoquímico, gas irritante para los ojos y las vías respiratorias.

Adicionalmente estos gases residuales producen efectos ambientales negativos a la atmósfera; a saber el CO₂, NO₂, vapor de agua, son uno de los principales gases que contribuyen al efecto invernadero, al igual que el smog fotoquímico; el SO₃ y el NO₂ al combinarse con la humedad del ambiente forman el H₂SO₄ y el HNO₃ respectivamente contribuyendo a la generación de la lluvia ácida y afectando la fauna. El material particulado que se genera debido a la combustión incompleta se deposita en las hojas de

los árboles circundantes impidiendo la realización de la fotosíntesis y la consecuente muerte natural de los mismos.

4.2.- IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS QUE SE GENERAN MEDIANTE BOMBEO SOLAR

En este escenario, para el bombeo solar solamente se requiere el uso de la energía solar, la cual es una energía limpia y no genera impactos ambientales negativos al medio ambiente en tiempo real.

No obstante, se trata de una actividad antropogénica y toda actividad antropogénica de alguna manera afecta al medio ambiente; en el caso de la quema de combustibles fósiles el impacto ambiental negativo a la atmósfera es inmediato, pero para el caso del bombeo solar es a largo plazo, esto debido a los materiales que componen un panel fotovoltaico.

Los paneles fotovoltaicos no son biodegradables y tienen una vida útil promedio de 25 años; después de esto como método alternativo se reciclan recuperándose alrededor del 85% de estos para fabricar otros nuevos y el resto debe tener una disposición final adecuada a fin de que no se convierta en chatarra inútil y contaminante.

Un panel fotovoltaico está compuesto de los elementos que se indican en la Tabla N° 10.

Material	Módulo de silicio cristalino
Vidrio	74%
Aluminio	10%
Silicio	3%
Láminas de etileno vinil acetato (EVA)	1%
Otro metales raros (Pb, Ag, Cd)	12%

Tabla N° 10.- Materiales componentes de un panel fotovoltaico de silicio cristalino

El vidrio, el aluminio, los que tienen el mayor porcentaje son materiales no peligrosos y son fáciles de reciclar, con respecto al silicio en el proceso de reciclaje se recupera un 75%.

A pesar de todo y en comparación con la quema de combustibles tradicionales, se infiere que el uso de la energía solar es la más respetuosa con el medio ambiente, no hay contaminación en tiempo real, por lo que resulta en una excelente alternativa para la explotación de las aguas subterráneas con fines agrícolas y consumo humano y pecuario.

CAPITULO 5: CALCULO DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR CON FINES AGRÍCOLAS

5.1.- CONSIDERACIONES PRELIMINARES

El cálculo de un sistema de bombeo solar no es de carácter general, por el contrario es específico, particular, i.e: depende del área de riego, tipo de cultivo, régimen de riego en época de inflorescencia, tipo de especies pecuarias y numero de personas involucradas en la zona de estudio o pozo de agua a ser accionado mediante bombeo solar. Es importante precisar que el consumo hídrico de especies pecuarias y de personas es mínimo con respecto al requerimiento hídrico que se requiere para cualquier tipo de cultivo.

Para efectos de cálculos he seleccionado el sector El Arrozal, perteneciente al Distrito de Motupe, en donde se tiene como principales cultivos al mango, maracuyá, maíz y limón, cuyos consumos hídricos (m^3/Ha -año), denominado coeficiente de riego, se obtienen de la información proporcionada por la Junta de Usuarios del Valle Chancay-Lambayeque. En la Tabla N° 11 se indican los cultivos y sus correspondientes coeficientes de riego por mes (Ver Anexo N° 05).

Cultivo-Variedad	DESAGREGADO MENSUAL VOLUMEN DE AGUA POR MESES DE RIEGO-COEF. RIEGO(m^3/Ha)												($m^3/año$)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Maíz amarillo	3000		1600	1600									6200
Mango criollo	800	800	800	800	900	1000	900	1000	1000	1000	900	900	10800
Maracuya	2600		1700	1400	1400								7100
Limón	800	800	800	800	900	1000	900	1000	1000	1000	900	900	10800
Total (m^3/mes)	7200	1600	4900	4600	3200	2000	1800	2000	2000	2000	1800	1800	34900
Total($m^3/día$)	66.7	14.8	45.4	42.6	29.6	18.5	16.67	18.5	18.52	18.52	16.67	16.67	

Tabla N° 11.- Módulos (m^3/Ha) y Coeficientes de Riego de los Cultivos

Fuente: Junta de Usuarios Chancay-Lambayeque, Comisión de Regantes de Lambayeque, año agrícola: Agosto 2015-Julio 2016.

De la Tabla N° 11 se puede observar que el primer mes (enero) y el maíz amarillo corresponden al mes y cultivo críticos que requieren un mayor consumo hídrico, con valores de $7200 m^3/Ha$ y $3000 m^3/Ha$ respectivamente; de manera que el cálculo se hará en base a estos valores, garantizando el riego para los otros cultivos.

5.2.- REGIMEN DE RIEGO

Es razonable considerar que no todos los cultivos se van a regar al mismo tiempo, por lo que se hace necesario establecer un régimen de riego, régimen que queda a criterio del agricultor o propietario del pozo, esto con la finalidad de no tener un reservorio demasiado grande para el almacenamiento del agua.

El maíz requiere 3000 m³/mes o equivalente a 300 m³/día; si se considera un régimen de riego de 0,25 Ha durante 6 horas diarias, se requiere 15 m³ de agua por día.

De lo expuesto se puede construir un reservorio que almacene 18m³, cuyas dimensiones serán de 4m de largo, 3m de ancho y 1,5m de alto.

5.3.- SELECCIÓN DEL POZO

De todo el espectro de pozos de agua proporcionado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA) he seleccionado pozos ubicados en el sector de El Arrozal, pertenecientes al Distrito de Motupe, de los cuales cuatro de ellos tiene como datos de medición, aparte del caudal, el nivel dinámico, el cual es dato importante para determinar la potencia del equipo motor-bomba solar a seleccionar. En la Tabla N° 12 indica los referidos pozos.

POZO N°	PROPIETARIO	Q (l/s)	Hd (m)	REGIMEN EXPLOTACIÓN			VOLUMEN (m ³ /año)
				h/d	d/m	m/a	
249	Augusto Obando Obando	13	12,8	6	4	5	5616
255	Ana María Hinojoza Vilchez	2,5	11,5	3,5	4	12	1555
393	Eduardo Espinoza Burneo	30	12,4	8	26	12	269568
678	Pedro Salazar Vallejos	12	9,25	3	2	12	3110,4

Tabla N° 12.- Pozos de agua con niveles dinámicos (Hd) en el sector El Arrozal-Motupe
Fuente: Elaboración propia en base a la información proporcionada por el MINAG (ANA) - censo 2014.

Para el cálculo a efectuar he seleccionado el Pozo N° 255, que tiene un nivel dinámico de 11,5m, un caudal de bombeo utilizando petróleo de 2,5 l/s, régimen de explotación de 3,5 h/d, 4d/m y 12m/a.

5.4.- CALCULOS PARA BOMBEO SOLAR

5.4.1 Datos considerados

- Recurso hídrico diario : $V_h = 15 \text{ m}^3/\text{día}$

- Altura total de bombeo : $H_t = (H_d + H_r) \times H_p = (11,5 + 3,5) \times 1,1 = 16,5\text{m}$

Donde: H_d es la altura dinámica = 11,5m

H_r es la altura de descarga del agua en el reservorio con respecto al nivel del suelo = 3,5m

H_p son las pérdidas hidráulicas considerado como un 10% de $H_d + H_r$

- HSP = 4,21 es la hora solar pico para la zona de estudio, correspondiente al peor mes (julio).

- Potencia pico del panel fotovoltaico (P_{ph}) : 100 Wp , 12V

- Rendimiento mecánico medio (η_m) : 25%

5.4.2 Energía de extracción de agua de pozo

$$E_h = 1000 \times 9,81 \times 15 \times 16,5 / 1000 \times 3600 = 0,674 \text{ Kw-h/día}$$

$$E_e = E_h / \eta_m = 0,674 / 0,25 \approx 2,7 \text{ Kw-h/día}$$

5.4.3 Potencia del grupo motor-bomba (P_{mb})

$$P_{mb} = E_e / HSP = 2,7 / 4,21 = 0,641 \text{ Kw.}$$

5.4.4 Caudal requerido (Q)

$$Q = V_h / HSP = 15 / 4,21 = 3,56 \text{ m}^3/\text{h} (0,99 \text{ l/s})$$

5.4.5 Cálculo de la energía requerida en el panel fotovoltaico (E_{ph})

$$E_{ph} = E_e / \eta_c = 2,7 / 0,95 = 2,84 \text{ Kw-h/día}$$

Donde η_c es la eficiencia de los conductores eléctricos que unen al motor eléctrico con el sistema de los paneles fotovoltaicos.

5.4.6 Cálculo del número de paneles fotovoltaicos (N)

$$N = E_{ph} / (P_{ph} \times HSP) = 2,84 / (0,1 \times 4,21) = 6,75 \rightarrow 7 \text{ paneles (paralelo)}$$

Se selecciona 08 paneles (02 grupos en serie con 04 paneles en paralelo por grupo)

La Figura N° 10 que se indica a continuación muestra el correspondiente arreglo fotovoltaico.

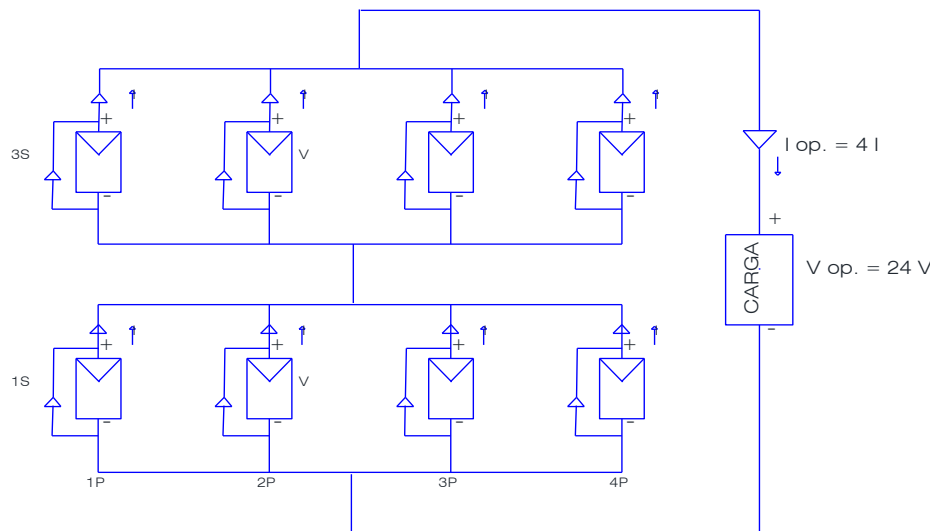


Fig. N° 10. Arreglo fotovoltaico del pozo seleccionado

Como se ha elegido un panel solar de 1 Wp, 12 V, el sistema trabaja a una tensión de 24 V, con una corriente total $I_{op} = 4 (1/12) = 1/3$ Amp.

5.4.7 Selección del equipo motor-bomba solar

De la Figura N° 04, teniendo en cuenta el recurso hídrico diario ($15 \text{ m}^3/\text{día}$) y una altura total de 16,5m , se selecciona una bomba centrífuga sumergible.

Teniendo en cuenta que la potencia requerida es de 0,641 Kw (0,86 HP), se selecciona un motor eléctrico de corriente continua de imanes permanentes, de 1 HP, 24 V a ser instalado en la superficie del pozo en consideración.

CAPITULO 6: CONSIDERACIONES TÉCNICO - ECONÓMICAS DEL BOMBEO SOLAR

El análisis económico es de gran trascendencia a la hora de decidir realizar una inversión que presenta una alternativa distinta. En la zona de estudio vienen los propietarios durante muchos años explotando las aguas subterráneas mediante el uso de grupos electrógenos y cuando se les plantea la alternativa de reemplazar este método tradicional por el del bombeo solar, lo primero que preguntan es “cuanto cuesta”, adicionando a esto el grado de incertidumbre que tienen si funcionará o no para la satisfacción de sus necesidades; he constatado en el campo que existe una renuencia o una valla alta en la credibilidad del funcionamiento del bombeo solar, esto como consecuencia de la falta de difusión y escasez de conocimiento respecto al aprovechamiento del recurso solar.

Es necesario precisar que el costo de la instalación de un sistema de bombeo solar depende de las características generales de cada pozo y de la demanda hídrica requerida para satisfacer las necesidades agrícolas; es decir que la realidad económica de un pozo es puntual y no se puede generalizar, por lo que me permito en este acápite establecer consideraciones generales o referenciales técnico-económicas a tener en cuenta.

Es importante saber el costo del kW-h de energía producido por un sistema de bombeo solar para poder compararlo con el bombeo proporcionado por otras fuentes alternativas, que en este caso es el bombeo con grupo electrógeno.

En el año de 1990 la inversión era de \$ 5 para producir 1Wp con energía solar, ahora con la mejora de las tecnologías se ha reducido a \$ 1-2/Wp.

Las nuevas tecnologías que se vienen implementando con la finalidad de promover el bombeo solar están enfocadas a los siguientes aspectos:

- Disminución del costo del panel
- Disminución del plazo del retorno de la inversión inicial de 10-20 años a 2-5 años
- Simplificación mediante sistemas integrados
- Optimización de componentes: motores y sistemas de electrónica de potencia desarrollados para trabajar con energía fotovoltaica.
- Instalaciones robustas de libre mantenimiento.

Otro aspecto importante es el costo total de producción (CTP) tanto para el bombeo tradicional como para el bombeo solar; ver como evoluciona a lo largo de los años considerando los aspectos fundamentales de sus componentes y que a continuación se detallan:

- Combustibles
- Servicio técnico
- Repuestos
- Costos de instalación

En la Tabla N° 13 se detallan los aspectos que inciden en un sistema de bombeo con diesel (SBD) y un sistema de bombeo solar (SBS)

Combustible	SBD	SBS
Costo diario de combustible	X	
Transporte de combustible por semana	X	
Incremento anual en el precio del combustible	X	
Servicio técnico		
Mantenimiento anual (cambio de aceite, filtros, servicio, etc)	X	
Servicio de reemplazo del sistema	X	X
Repuestos		
Motobomba convencional	X	
Generador eléctrico con combustible	X	
Bomba de agua solar		X
Generador eléctrico fotovoltaico		X
Vida útil de la bomba de agua	X	X
Vida útil del generador eléctrico		X
Instalación inicial		
Costo de instalación		X
Bomba de agua solar		X
Generador eléctrico fotovoltaico		X
Ferretería y accesorios (sensores, conexiones, soportes,etc)		X

Tabla N° 13: Incidencia del CTP en los sistemas SBD y SBS

La Fig. N° 11 muestra de manera referencial la comparación a largo plazo del costo total de producción (CPT) entre el SBD y el SBS, en donde se observa la forma gradual como se incrementan los CPT del SBD debido básicamente al incremento del precio del combustible y su transporte; comparado con el CPT del SBS que es constante; se observa también que el retorno de la inversión inicial ocurre a los 3 años y que al final del periodo (10 años) se logra un ahorro económico del 56%.

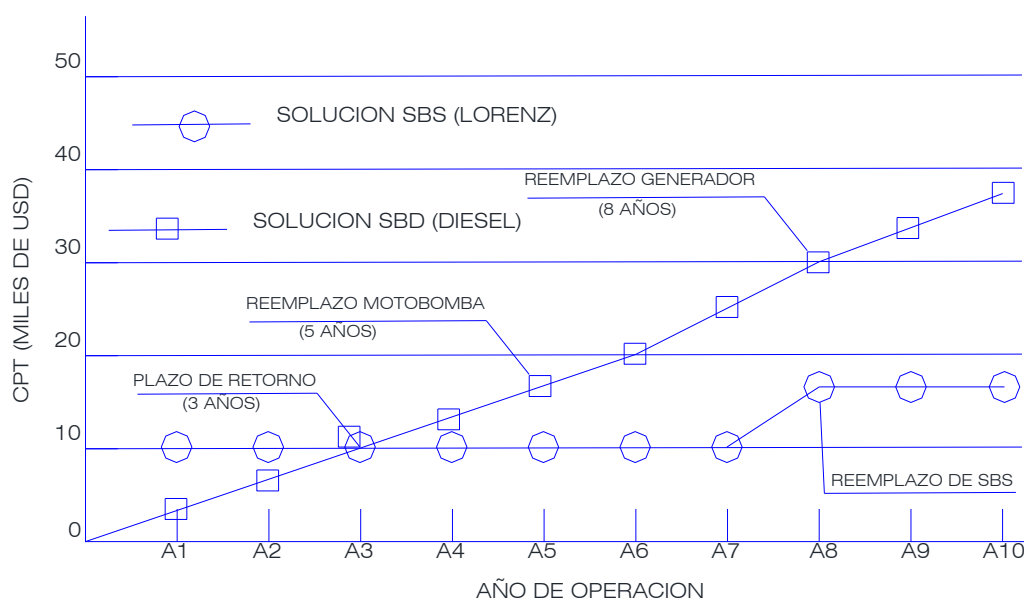


Fig. N° 11. Comparación a largo plazo entre sistemas SBD y SBS
Fuente: Lorentz – Solergiza.[11]

El plazo de retorno de la inversión inicial para la instalación de un sistema de bombeo solar (SBS) se acorta debido a la mejora de las tecnologías que se vienen desarrollando en sistemas de bombeo solar.

Como se ha expresado en la introducción del presente trabajo de investigación, el bombeo solar fotovoltaico resulta también rentable con respecto al uso de la energía eléctrica suministrada por la Concesionaria de Electricidad al contratarse una potencia fija con una tarifa eléctrica alta (MT2-industrial), la misma que tiene que cancelarse mensualmente si hace uso o no de la electricidad.

CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1.- CONCLUSIONES

- En la Cuenca Motupe-Olmos-La Leche, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA-MINAG-Censo 2014, reporta un total de 4339 de pozos tubulares y a tajo abierto, de los cuales 1118 están en estado de uso utilizables, según se indica en la Tabla N° 03, cuyas aguas subterráneas pueden ser explotados mediante el uso de un sistema de bombeo solar.
- El Mapa Solar del Perú elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) indica que la zona de estudio cuenta con una alta disponibilidad de energía solar diaria, la misma que oscila entre 5,5 a 6,5 Kwh/m².día. De acuerdo a la Tabla N° 06 se considera para efectos de cálculos solares una radiación solar disponible de 4,21 Kwh/m²/día correspondiente al mes de julio.
- Para el diseño del bombeo de agua mediante un sistema solar fotovoltaico se necesita conocer fundamentalmente la demanda hídrica requerida y la radiación solar disponible. Para determinar la demanda hídrica se considera la extensión agrícola, tipo de cultivo y tipo de riego correspondiente al mes de mayor consumo de agua.
- En el aspecto ambiental he efectuado cálculos para determinar la cantidad de CO₂ que se genera cuando se quema 1 galón de diesel o gasolina, obteniéndose valores de 10,13 Kg de CO₂ /galón de diesel y de 9,00 Kg de CO₂/galón de gasolina. Gases que contribuyen de manera significativa en el efecto invernadero.
- Los diversos gases residuales que se generan cuando se queman combustibles fósiles también afectan a la salud de las personas; así el CO causa daño al ligarse con la hemoglobina formándose la carboxihemoglobina (COHb), generándose decremento en la función cardíaca, deterioro visual, dolores de cabeza, náuseas, vómitos, dificultad en la respiración. Los HC que contienen benceno producen irritación a la piel, ojos, a los conductos respiratorios, mareos, náuseas, dolores de cabeza y causante del cáncer. El NO₂ es tóxico e irritante, afectando a la piel, tracto respiratorio y mucosa nasal. El CO₂ produce asfixia, causa hiperventilación. El SO₂ es irritante y tóxico, afecta las mucosidades y pulmones provocando ataques de tos; y el smog fotoquímico, gas irritante para los ojos y las vías respiratorias.
- Por el contrario en el bombeo solar fotovoltaico, el cual es caracterizado como el bombeo de caudales pequeños, extrae las aguas subterráneas de manera racional y necesaria justo para satisfacer la demanda hídrica del usuario, haciéndolo ambientalmente sostenible y sustentable en el tiempo, evitando el agotamiento prematuro del acuífero en consideración. Asimismo este sistema es prácticamente no contaminante, pero que a largo plazo (a los 25 años promedio de un panel solar) se generan impactos ambientales negativos por la disposición final de éstos que no son biodegradables, recuperándose alrededor del 85% para luego fabricar otros nuevos y el resto tener una disposición final adecuada a fin de que no se convierta en chatarra inútil y contaminante.

- En el aspecto técnico – económico preciso que si bien es cierto que el costo inicial para el bombeo solar (SBS) es alto con respecto al bombeo con diesel (SBD), en el tiempo resulta rentable. La Figura N° 11 muestra cómo el Costo total de Producción (CTP) del SBD se incrementa en el transcurrir del tiempo debido al incremento de combustible y su transporte, comparado con el CPT del SBS que es constante; adicionándose a esto el cambio de la motobomba y el grupo electrógeno a los 3 y 8 años respectivamente en el SBD.

7.2.- RECOMENDACIONES

- Debido a la falta de difusión y escasez de conocimiento respecto al aprovechamiento del recurso solar es que he encontrado en los usuarios o propietarios de pozos de agua una valla alta en la credibilidad del funcionamiento del bombeo solar para la explotación de las aguas subterráneas. En este escenario, se hace necesario como recomendación impartir charlas de orientación y capacitación, las mismas que se pueden hacer a través de las comisiones de regantes, con la finalidad de impulsar el uso de tecnologías limpias (energías renovables) como es el bombeo solar, como una buena alternativa para la explotación de las aguas subterráneas, cuyo funcionamiento permite el uso racional y sostenible en el tiempo del recurso hídrico que existe en el subsuelo, pues se han visto casos en que dicho recurso se ha agotado debido al bombeo innecesario de grandes caudales de agua cuando se emplean grupos electrógenos.

- Recomendar a las autoridades competentes: Ministerio de Agricultura, Ministerio de Energía y Minas, Gobierno Regional y Gobiernos Locales a la realización de charlas de educación ambiental y en particular el uso de la energía solar para fines agrícolas por ser una energía limpia y que no afecta la salud de las personas como es el caso cuando se bombea agua mediante el uso de grupos electrógenos.

CAPITULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Castro M., Colmenares A., Fiffe R., Pérez M., Perpiñán O. y Perulero J. 2011. Monografías Técnicas de Energías Renovables: Sistemas de Bombeo Eólicos y Fotovoltaicos. Edit. PROGENSA, España.
2. Tobajas M. Energía.2005. Solar Fotovoltaica. 2da. Edición. Ediciones CEYSA, España.
3. Alonso M., Chenlo F. 1999. Diseño y Dimensionado de Sistemas de Bombeo Fotovoltaico (Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica). Edit. CIEMAT.
4. Ministerio de Energía y Minas. 1990. Mapa solar del Perú. Lima-Perú
5. NASA. Surface Meteorology and Solar Energy, USA, 2013.
6. Ministerio de Agricultura y Riego (MINAG)-Autoridad Nacional del Agua (ANA). 2015. Características Técnicas, Mediciones y Volúmenes de Explotación de Pozos. Lima-Perú.
7. Marcelo D. 2013. Energía Solar Fotovoltaica: Bombeo Solar Fotovoltaico. Lambayeque-Perú.
8. Ayala A. 2012. Bombeo de agua con renovables. CPR MERIDA. España
9. Ortiz J., Marcelo D. 2013. Dimensionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico para una zona rural de piura, Perú.
10. Sánchez A. 2009. Sistemas fotovoltaicos iluminación y bombeo. ANES, España.
11. Figueroa H., Lard. M. 2014. El auge de la energía solar fotovoltaica en sistemas de riego. Lorentz-Solergiza.

ANEXOS