

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICA**



**Tesis Monográfica para optar al Título de  
Ingeniero Eléctrico**

**Título:**

**“ESTUDIO DE PREINVERSION DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA  
BOMBEO DE AGUA EN LA COMUNIDAD DE SAN ANTONIO DEL  
MUNICIPIO DE JINOTEPE”.**

**Autores:**

- Br. David Antonio Salmerón Rodríguez 2008-23952
- Br. Jimmy Alexander Blandón Rivas 2009-30150

**Tutor:**

Ing. Juan González Mena

**Managua, Septiembre 2014**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

I. Introducción .....	4
II. Antecedentes .....	5
III. Planteamiento del Problema.....	6
IV. Objetivos del Estudio.....	7
V. Justificación .....	8
VI. Hipótesis y Variable .....	9
VII. Metodología de Trabajo .....	10
VIII. Marco Teórico .....	11
1. Definiciones .....	11
2. Paneles Fotovoltaicos.....	12
3. Bombeo Fotovoltaico .....	15
4. Funcionamiento del sistema de bombeo solar .....	17
5. Descripción del sistema de bombeo Fotovoltaico .....	18
5.1 Condiciones hidráulicas.....	19
5.2 Subsistema de generación .....	24
IX. Dimensionamiento del sistema de Bombeo Fotovoltaico .....	28
1. Calculo del régimen de bombeo. ....	29
2. Calculo de la carga estática. ....	29
3. Calculo del recorrido de tubería.....	30
4. Calculo de la carga por fricción. ....	30
5. Calculo de la carga dinámica total.....	30
6. Calculo de la energía hidráulica.....	31
7. Calculo de la energía del arreglo fotovoltaico.....	31
8. Calculo de la carga eléctrica. ....	32
9. Calculo de la carga eléctrica corregida.....	32
10. Calculo de la corriente del proyecto. ....	32
11. Calculo de la corriente ajustada del proyecto.....	33
12. Calculo de módulos en paralelo. ....	33
13. Cálculo de los módulos en serie .....	33

14.	Calculo del número total de módulos fotovoltaicos .....	34
15.	Calculo del tamaño del arreglo. ....	34
16.	Calculo del agua bombeada. ....	34
17.	Calculo del régimen de bombeo. ....	34
X.	Conclusiones.....	38
XI.	Bibliografía.....	40

---

## **I. Introducción**

La energía es un importante factor para el desarrollo y crecimiento económico de un país, ya que provee de fuerza a muchos de los aparatos y maquinas que ayudan a producir trabajo. Aunque normalmente la energía que se utiliza es a través del uso de combustibles fósiles, la energía renovable como la del sol y la del viento, son una fuente limpia, como abundante e inagotable fuente de energía.

Existen hoy tecnologías a nivel comercial que permiten hacer uso de esas fuentes de energía renovable, para generar trabajo útil y productivo y cuando se utilizan apropiadamente, son una alternativa económicamente factible. A nivel comercial, existe una gran variedad de aplicaciones, para el uso doméstico e industrial y en algunos casos, para el sector agropecuario.

Actualmente se encuentran muchos sistemas de bombeo de agua con energía de la red en operación en nuestro país, pero esta solución es limitada en sectores donde hay disponibilidad de energía eléctrica.

El propósito de esta Tesis es presentar una solución a los sistemas de bombeo de agua con energía solar fotovoltaica ya que es una aplicación de especial interés en sistemas aislados.

Los sistemas son confiables y económicamente competitivos para el productor rural. Los sistemas solares de bombeo pueden satisfacer un amplio rango de necesidades que van desde 1000 litros diarios hasta los 50,000 litros diarios tanto para el uso doméstico como para irrigación de pequeñas parcelas.

Estos sistemas son sencillos y confiables, requieren de poco mantenimiento y no usan combustible. Otra ventaja es que son sistemas modulares de manera que pueden optimizarse para las características específicas de cada proyecto

---

## **II. Antecedentes**

Hoy en día, la tecnología fotovoltaica disponible comercialmente es una alternativa real para su aplicación en diversas tareas domésticas, industriales y agropecuarias. Sin embargo es necesario de un análisis de viabilidad económica y factibilidad técnica para determinar si es la más apropiada para tal fin.

Las aplicaciones comunes en el sector agropecuario son bombeo de agua, cercos eléctricos, calentadores de agua, además de la electrificación básica para fines domésticos.

El bombeo de agua en pequeña escala es una aplicación de mucha trascendencia en el en nuestro país; tiene especial impacto en comunidades rurales donde no hay suministro de energía eléctrica convencional y donde el gobierno ha intervenido para resolver el problema grave de la escasez de agua a través de instituciones como el IDR.

En Nicaragua el proyecto PRODESEC del IDR en el 2010 beneficio a pequeños productores de zonas aisladas del Departamento de León y Chinandega de pozos perforados con Bombas de diésel y bombas de mecate. No dando así una solución viable a las necesidades de las comunidades.

Por otro lado en el año 2012 la Fundación San Lucas ha diseñado un proyecto de bombeo de agua utilizando energía solar en la comunidad el Manantial, municipio de Jinotepe del Departamento de Carazo.

Además, en el proyecto de El Manantial cuentan con un Centro Experimental para aprovechar la tecnología como un instrumento clave en sus prácticas de cultivo, partiendo por la selección de lo que siembran y con miras a que los beneficiarios tengan alimentos durante todo el año. En el desarrollo de esta iniciativa, además la fundación ha contado con el respaldo de la Universidad Nacional Agraria - Trocaire.

---

### **III. Planteamiento del Problema**

La comunidad de san Antonio se encuentra al oeste del Municipio de Jinotepe con una población de 60 habitantes, actualmente está aislada del sistema de distribución eléctrico nacional, el escasez de agua es una problemática que siempre los ha afectado, tiene una extensa zona agrícola, donde generalmente se cultivan hortalizas y frijoles, que requieren agua para su irrigación. En esta meseta de los pueblos, tiene como característica que existen zonas que hay aguas subterráneas en distintas zonas, a distinto niveles de profundidad.

La Profundidad de las aguas subterráneas en el área investigada fluctúa entre los 290 pies y 325 pies.

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, la disponibilidad de agua durante el año es buena, es por ello la construcción de pozos que se encuentran equipados con sistemas fotovoltaicos.

Para elaborar el presente trabajo de investigación se toma en cuenta hacer estudio de una fuente energética limpia de bajo impacto ambiental que tenga una amplia disponibilidad en distintos puntos y que sea renovable.

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía viable para nuestro propósito por cumplir con las condiciones y requisitos necesarios para nuestro estudio en el cual la energía solar fotovoltaica será usada como fuente generadora de energía eléctrica para accionar las bombas de agua. Aunque actualmente, resulte excesivamente costoso, es una aplicación que puede presentar en el futuro un gran potencial de desarrollo.

---

## **IV. Objetivos del Estudio**

### **2.3 Objetivo General**

- Diseñar un proyecto de energía fotovoltaica con características de Viabilidad para el bombeo de agua.

### **2.4 Objetivo Específicos**

- Realizar el estudio de dimensionamiento de fuente de generación y los cálculos hidráulicos del sistema de bombeo fotovoltaicos.  
Realizar los cálculos hidráulicos para el sistema de bombeo de agua.

---

## **V. Justificación**

La situación que se vive en nuestro planeta debido a la contaminación producida por la utilización de energía generada de combustibles fósiles, ha obligado a tomar alternativas como las energías renovables para reducir en cierta medida el daño ecológico causado.

El aprovechamiento de la energía solar es una de las opciones para detener y mitigar los daños que la sociedad ha causado y causa en la naturaleza, es por eso que se requiere de equipos y sistemas en los cuales se implementen las diferentes aplicaciones de la energía solar, entre las cuales se encuentra el bombeo fotovoltaico.

En base a los criterios mencionados en los párrafos anteriores, es que se fundamenta la decisión de diseñar un sistema de bombeo de agua que funcione a través de energía solar fotovoltaica, con el propósito de dar solución a comunidades aisladas de fuentes convencionales de energía eléctrica.

La importancia en desarrollar un sistema de bombeo fotovoltaico es demostrar que sus aplicaciones están a nuestro alcance y comprobar que este tipo de sistema posee la factibilidad económica para poder implementarse dentro de cualquier ámbito industrial.

El uso de energías provenientes de combustibles fósiles es, en esos casos, el más ampliamente difundido para la extracción y traslado de líquido hasta los lugares de almacenamiento y consumo. Lo anterior implica por lo general costos de operación y mantenimiento sumamente altos, que en muchas ocasiones no pueden ser pagados por los usuarios.

Este tipo de situaciones somete a muchas comunidades a los estragos de la sequía o bien a utilizar fuentes de agua superficiales altamente contaminantes y perjudiciales para la salud.

---

## **VI. Hipótesis y Variable**

### **Hipótesis**

La necesidad de desarrollo de un proyecto de bombeo de agua Fotovoltaico que de respuesta a la situación de escasas de agua a la comunidad de San Antonio del municipio de Jinotepe.

### **Variables**

1. Pertinencia de la Información.
2. Funcionalidad de la Información.
3. Adecuación de la Información.
4. Parámetros Técnicos de Interés (Voltaje, Corriente, capacidad del sistema de bombeo, potencial de ahorro de energía, capacidad de generación de energía).

---

## VII. Metodología de Trabajo

En esta metodología se hace un análisis de los pasos a realizar en el diseño del sistema fotovoltaico para bombeo de agua, así como los criterios que se tienen que considerar para poder ser aplicados, contemplando las normas de diseño eléctrico y el dimensionamiento del sistema de bombeo.

Breve descripción de cómo realizar el diseño del sistema en una zona rural:

1. El diseño del sistema fotovoltaico para bombeo de agua comienza cuando el ingeniero eléctrico visita el lugar.
2. Teniendo en cuenta la ubicación de la comunidad es necesario determinar la problemática a resolver y ver cuál es la solución más viable al problema.
3. Desde ahí se comienza a realizar un estudio de capacidad de demanda de agua de la comunidad.
4. Teniendo esta información se puede empezar a determinar los dimensionamientos de: paneles solares, bomba de agua, banco de baterías, sistema de control a utilizar etc.
5. Elaborar un presupuesto de la obra para determinar la rentabilidad de la misma.

---

## VIII. Marco Teórico

### 1. Definiciones

#### **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  $1.52 \cdot 10^{17}$  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  $1366 \text{ W/m}^2$  , variable durante el año un 3% a causa de la electricidad de la órbita terrestre.

***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 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.

---

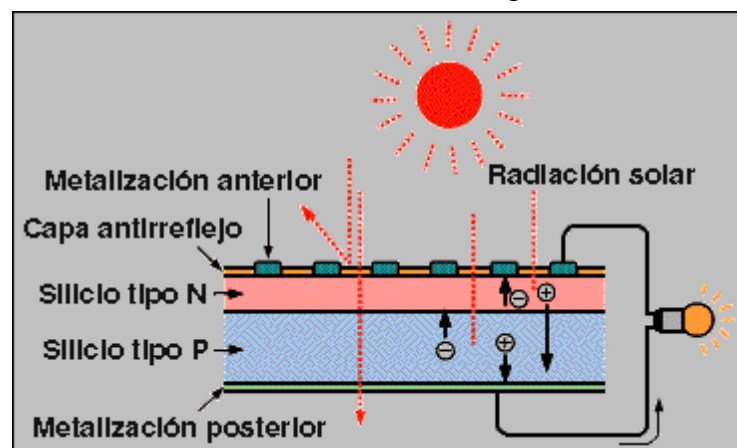
**Horas Sol Pico:** es el número de horas de sol que con una radiación global de 1000 W/m<sup>2</sup> proporciona una energía equivalente a la radiación global recibida en un período de tiempo.

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

## 2. Paneles Fotovoltaicos.

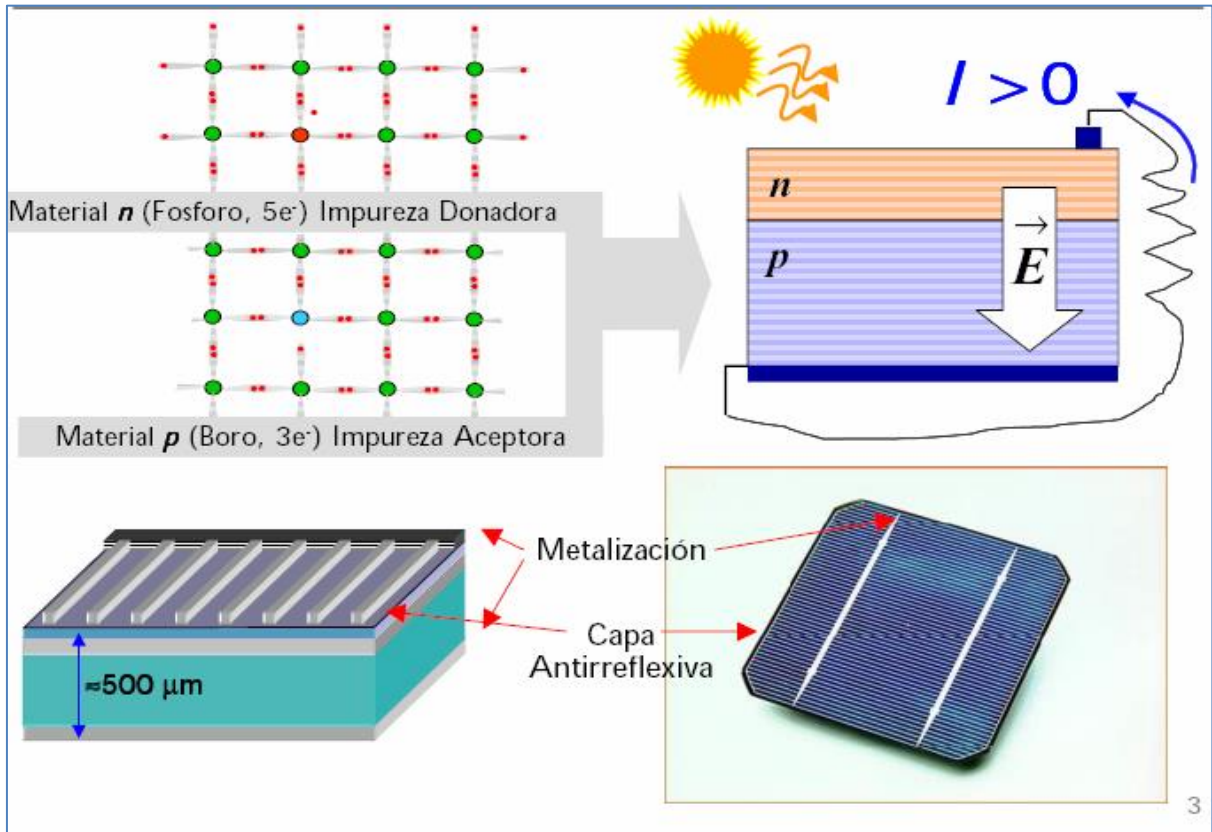
**Efecto fotovoltaico:** transformación directa de energía luminosa en energía eléctrica. Este fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente la radiación luminosa. Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula. Como la muestra la figura 1 a continuación.

Fig 1



**Célula solar:** dispositivo unitario correspondiente al elemento semiconductor que presenta el efecto fotovoltaico, ya esté protegido de ambiente exterior o no a como muestra en la siguiente figura 2

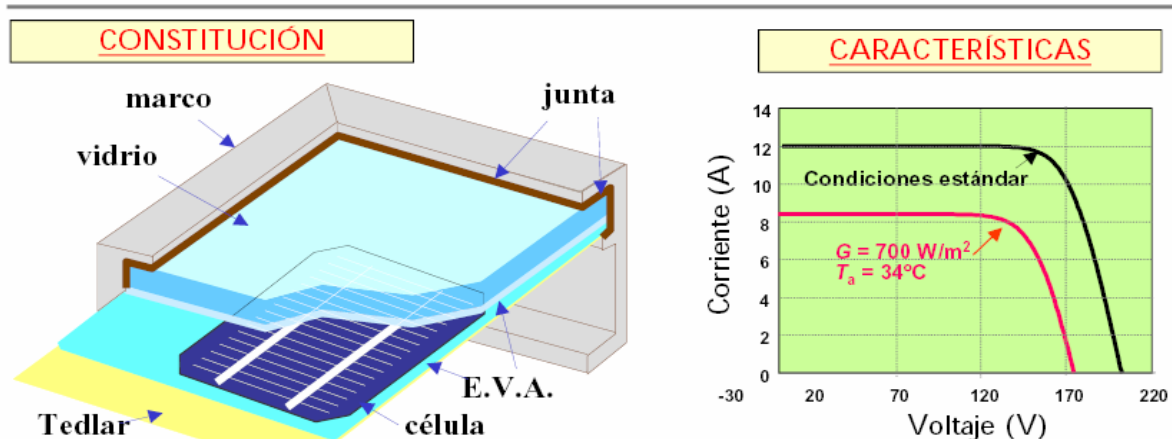
Fig 2



**Módulo Solar:** conjunto de células solares interconectadas y montadas sobre un mismo soporte protector. Figura 3

Fig 3

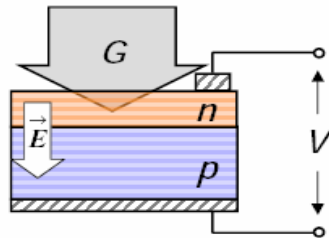
### El módulo convencional



**Tensión de Circuito Abierto:** es la diferencia de potencial medido en los bornes de una célula o módulo cuando el circuito está abierto en unas ciertas condiciones de medida. Figura 4

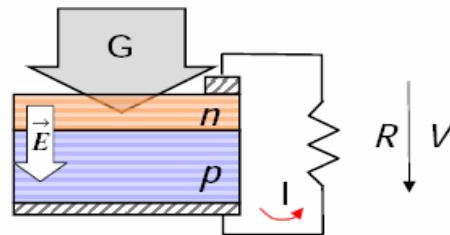
Fig 4

Tensión de circuito abierto



Generación  $\equiv$  Recombinación  
 $G = 0 \Rightarrow V = 0$   
 $G > 0 \Rightarrow V = V_{OC}$   
 $V_{OC}$  = Característica del material

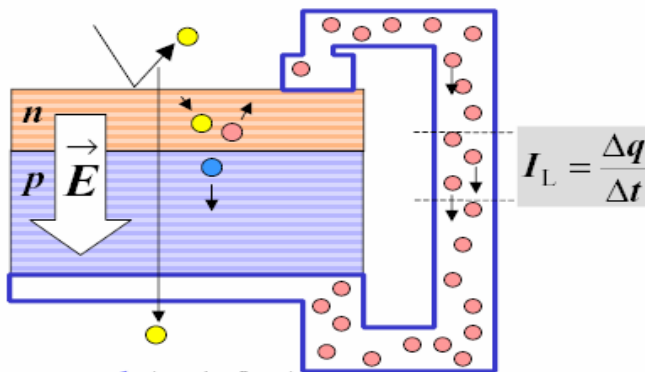
Célula solar con carga



$$I = \frac{V}{R} \quad V < V_{OC}$$

**Corriente de Cortocircuito:** es el valor de la corriente que proporciona la célula o módulo iluminados bajo condiciones estándar, cuando sus bornes están cortocircuitados. Figura 5

Fotocorriente

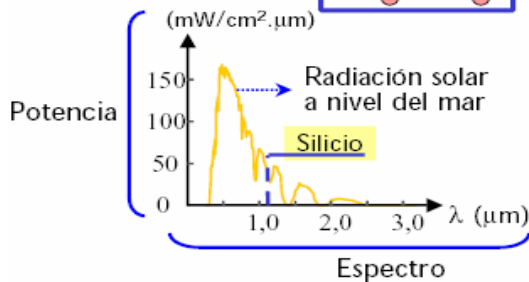


Intercambio de energía entre fotones y red cristalina

- + Total fotones
- Reflejados
- No absorbidos
- No encuentran enlace

---

FOTONES ÚTILES = CARGAS GENERADAS

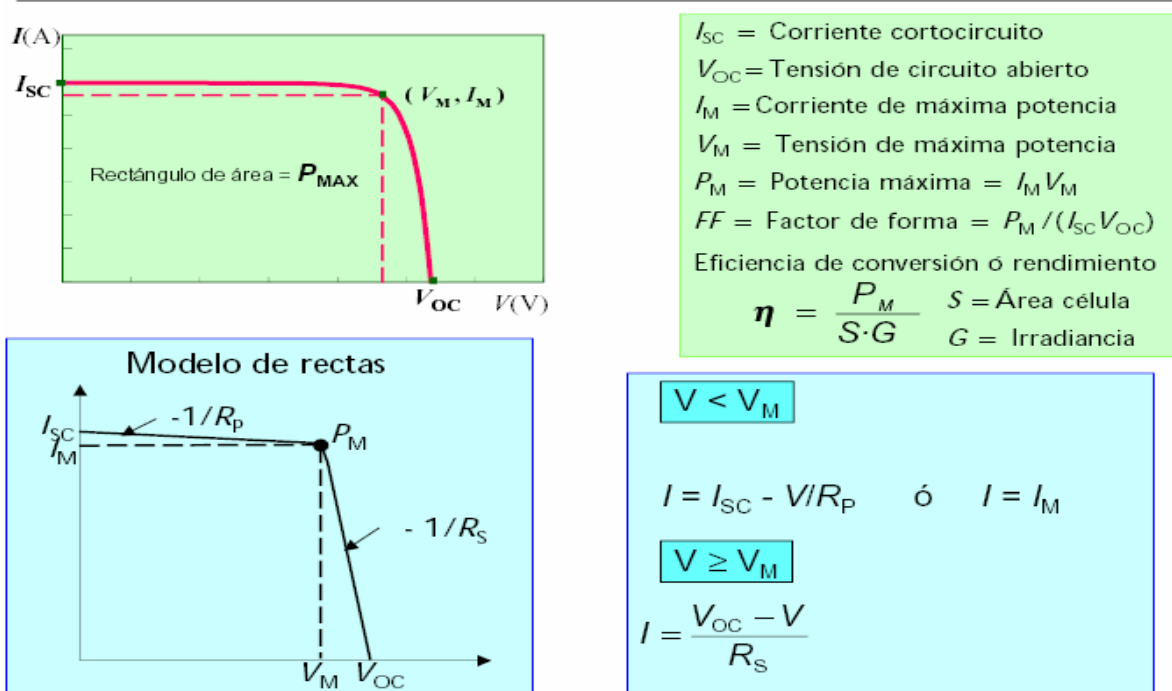


Fotocorriente = Cargas generadas - Cargas absorbidas (recombinadas)

$$I_{SC} = I_L$$

**Potencia máxima:** es la máxima potencia que en determinadas condiciones de medida pueda proporcionar una célula o módulo solar Figura 6

Fig 6



### 3. Bombeo 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 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 buscara maximizar la utilización de la energía disponible mediante una rotación sistemática de cultivos o cultivos permanentes.

Existen dos alternativas de sistemas de bombeos fotovoltaicos que son:

- **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.

- **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:

- **Módulos fotovoltaicos:** Captan la energía del sol y la convierten en electricidad en corriente continua

- **Acoplamiento módulos-bomba:** Transforma la energía generada por los módulos fotovoltaicos en adecuada para el funcionamiento de la bomba

- **Bomba:** El equipo fundamental que extrae el agua del pozo. Figura 7 y 8

Fig 7

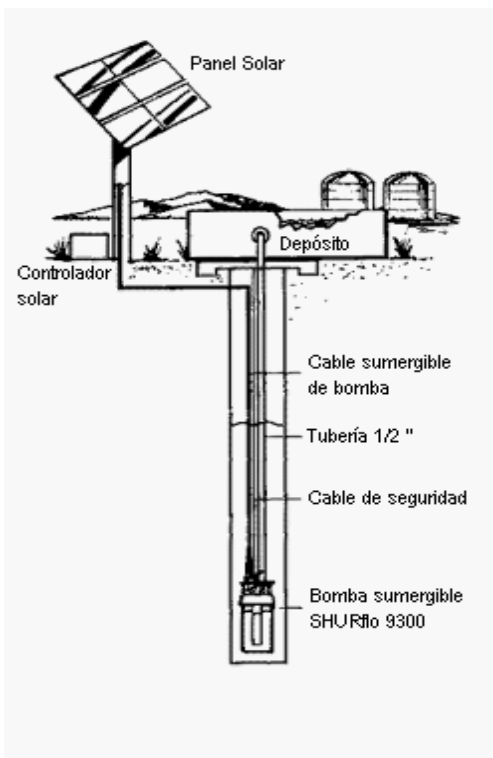
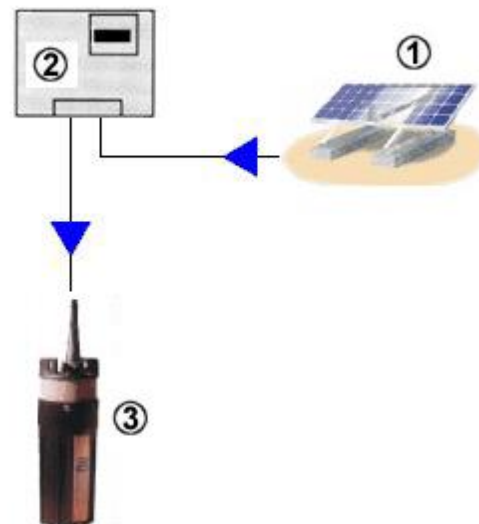


Fig 8



---

#### **4. 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 anterior, como sus principales componentes son: un arreglo de módulos fotovoltaico, un controlador, un motor y una bomba y por ultimo un tanque de almacenamiento.

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

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.

## **5. Descripción del sistema de bombeo Fotovoltaico**

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:

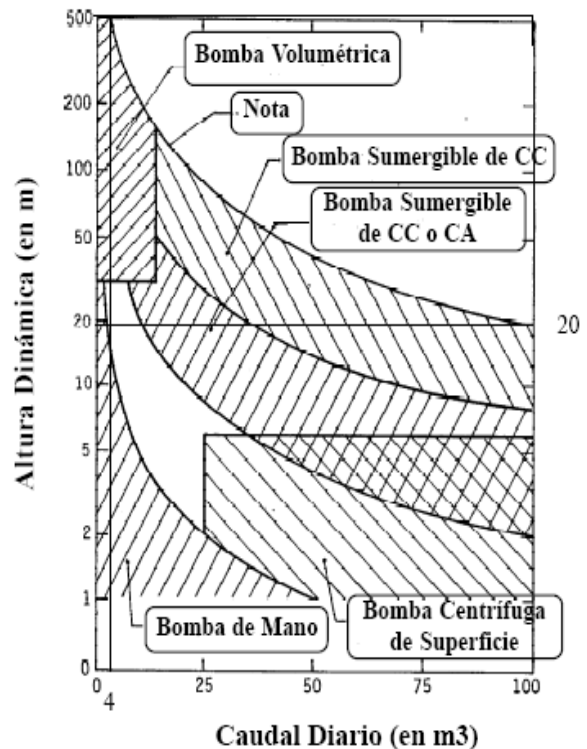
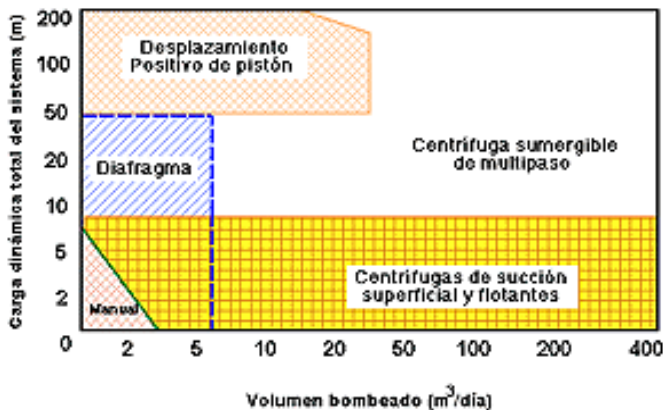
- Subsistema de generación o generador fotovoltaico.
- Subsistema motor-bomba
- Subsistema de acumulación y distribución

Analicemos los factores que determinan la configuración del sistema.

## 5.1 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)

$CDT = CE + CD = \text{Nivel estático} + \text{abatimiento} + \text{altura de la descarga} + \text{fricción}$



### 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 muestra estos componentes hidráulicos que forman carga estática. Figura 9 y 10

Fig 9

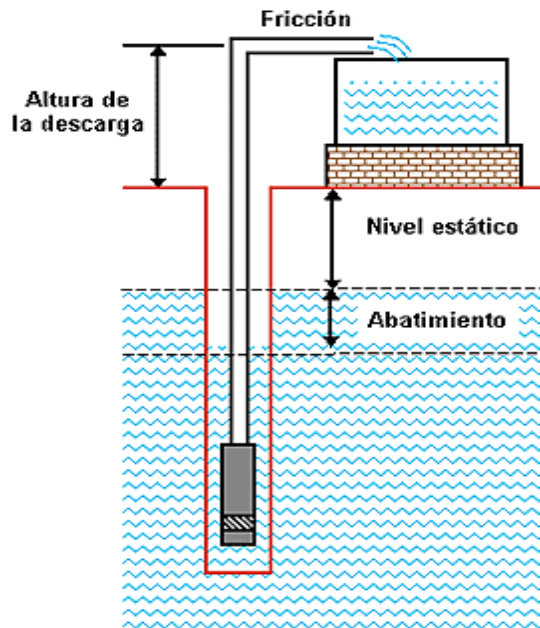
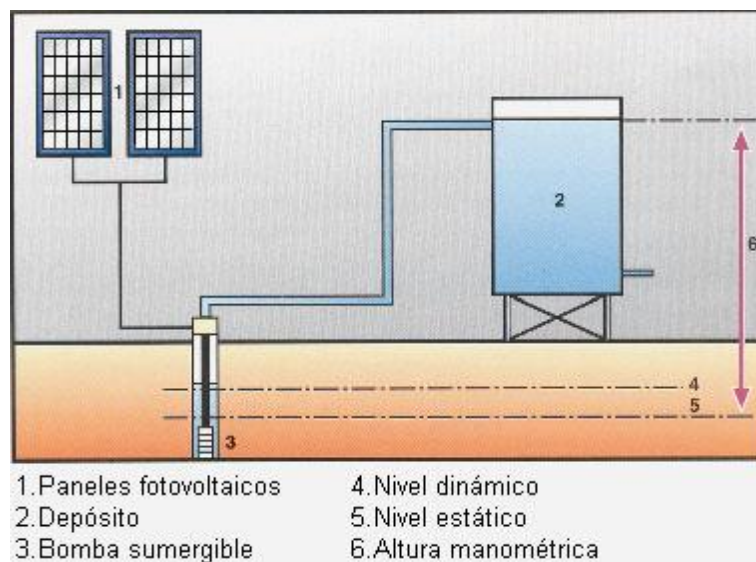


Fig 10



---

## **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 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 maneras.

### **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.

### **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:

$$H_f = K \times L \times Q^2$$

---

Dónde:

Hf 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  $(\text{m}^3/\text{s})^{-2}$

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 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

La constante k se obtuvo después de experimentar con varios materiales y tamaños de tuberías.

<b>Material</b>	<b>Diámetro en pulgadas</b>				
	<b>0.5</b>	<b>0.75</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>
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

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 a40 litros por persona. Para el uso agrícola varía según el cultivo y las condiciones climatológicas del lugar. Se estima, en 50 a 300  $\text{m}^3$  por hectárea / día.

---

No debemos olvidar hacer un estudio de capacidad de fuente de la que se va a bombear y sus variaciones estacionales. Se deberá prevenir cualquier caso que la bomba se quede sin agua mediante interruptores de flotación que detengan el bombeo cuando el agua descienda por debajo de un determinado nivel.

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

$$E_h = \rho \times g \times V \times h$$

Dónde:  $\rho$  es la densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>),  $V$  es el volumen del agua necesario diariamente (valor medio del mes en m<sup>3</sup>/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 expresión:

$$h_d = f \times (L/d) \times (v^2/(2 \times g))$$

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<sup>2</sup>).

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:

$$h_d = K \times (v^2/(2 \times g))$$

---

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.

## 5.2 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 irradiación 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:

Voc = Voltaje de circuito abierto

Isc = Corriente de corto circuito

Pmax = 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 irradiación 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 módulo en donde se mostrara las curvas características del panel solar así como sus datos técnicos que se proporciona en fabricante a las condiciones de trabajos respectivas: Tabla 1, 2 y 3

Tabla 1

Modelo	VLX-53
Pp	53 W
Vp	17.2 V
Ip	3.08 A
Vca	21.5 V
Icc	3.5 A
Condiciones	1000 W/m <sup>2</sup> 25 °C

Tabla 2

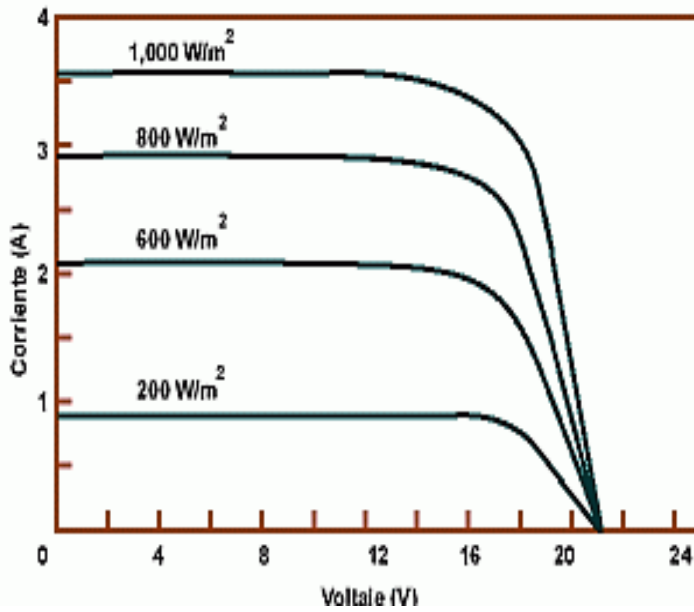
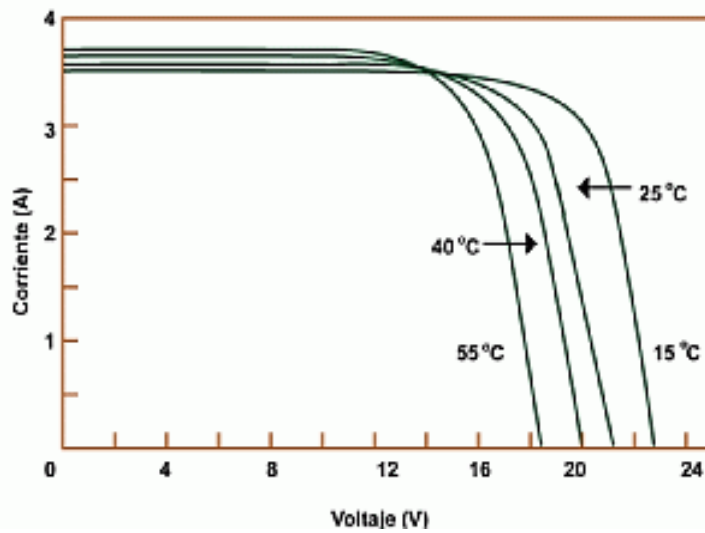


Tabla 3



---

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,  $\eta_{mb}$ , al que le podemos asignar un valor entre 0.3 y 0.4:

$$E_e = E_h / \eta_{mb}$$

Conocida la energía eléctrica diaria que es necesario aportar y a partir del dato de radiación diaria mensual y del rendimiento medio del generador fotovoltaico se obtiene el área de superficie colectora necesaria:

$$A = E_e / \eta_{fv} \times H_{dm}$$

El rendimiento fotovoltaico se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{fv} = F_m \times (1 - \gamma(T_c - 25)) \eta_g$$

Siendo:  $F_m$  el factor de acoplo medio, definido como el cociente entre la energía eléctrica generada en condiciones de operación y la energía eléctrica que se podría generar si el sistema trabajase en el punto de máxima potencia. Un buen acoplamiento correspondería a valores medios para este factor superior a 0.8.

$\Gamma$  es el coeficiente de variación de la potencia con la temperatura de las células (entre 0.004 y 0.005 °C<sup>-1</sup>)

$T_c$  es la temperatura media diaria de los módulos durante las horas de sol.

$\eta_g$  es el rendimiento del generador a la temperatura de 25 °C y 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiancia.

---

Se puede considerar para un sistema bien dimensionado desde el punto de vista del acoplamiento entre el generador y el grupo motor bomba, que las mayores temperaturas del panel que afectan negativamente al rendimiento, se alcanza en los momentos de mayor irradiación en los que el sistema deberá operar con valores de acoplamiento elevados, estos es, en un punto próximo al de máxima potencia. Como consecuencia es habitual simplificar los cálculos utilizando un valor de rendimiento medio igual a  $0.8 \times \eta_g$ .

Para un cálculo más riguroso se puede determinar la temperatura media de las células mediante la siguiente expresión:

$$T_c = T_a + 0.03 \times I$$

Donde  $T_a$  es la temperatura ambiente e  $I$  es la irradiancia en ( $W/m^2$ ).

Luego, el área de superficie de panel necesaria será:

$$A = E_h / (\eta_{mb} \times F_m (1 - y (T_c - 25)) \eta_g \times H_{dm})$$

La potencia pico es la potencia proporcionada por el modulo en condiciones estándar de  $25^\circ C$  y  $1000 W/m^2$ , en las que el rendimiento es  $\eta_g$ , y que, por tanto, será:

$$P_p = \eta_g \times A \times 1000 = E_h \times 100 (\eta_{mb} \times F_m (1 - y (T_c - 25)) \times H_{dm})$$

La elección del modelo de modulo con más o menos células se serie y la configuración serie y paralelo de la asociación de módulos deberá hacerse teniendo en cuenta la curva  $I - V$  del grupo motor – bomba, tratando de conseguir que el sistema funcione prácticamente en el punto de máxima potencia durante las horas de mayor insolación.

---

## IX. Dimensionamiento del sistema de Bombeo Fotovoltaico

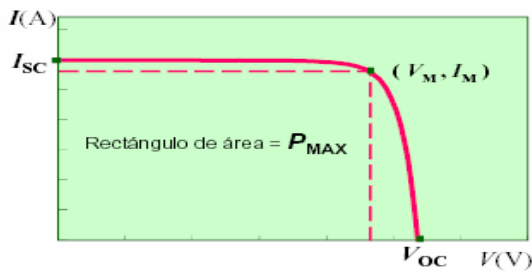
Tomando en consideración las necesidades del proyecto de la comunidad de san Antonio.

Para dimensionar el sistema de bombeo se parte del conocimiento de las necesidades diarias de agua que con la altura manométrica nos permitirá determinar la energía hidráulica que se necesita cada día.

Una vez que se conoce la energía hidráulica necesaria, a partir de los datos de energía solar disponible se diseña el sistema generador.

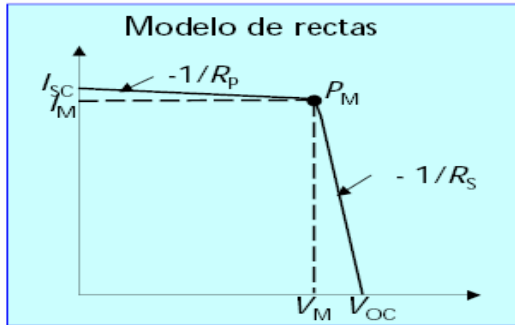
Conociendo el sistema generador se elige el motor y la bomba más adecuados a su curva característica I-V, dentro del tipo que se haya seleccionado atendiendo a las características de la instalación: altura manométrica diámetro del pozo, etc. Posteriormente se determina el caudal máximo que pueda proporcionar el equipo para dimensionar el sistema de tuberías, teniendo en cuenta que las pérdidas de carga en las mismas no debe superar el 10 %. Tabla 4

Datos		
caudal	1800	l/dia
reserva	3	l/dia
caudal extra	10%	l/dia
Nivel estático del agua	23	m
abastecimiento	1	m
altura de descarga	8,2	
distancia del deposito	3	
requerimiento diario	9000	



$I_{SC}$  = Corriente cortocircuito  
 $V_{OC}$  = Tensión de circuito abierto  
 $I_M$  = Corriente de máxima potencia  
 $V_M$  = Tensión de máxima potencia  
 $P_M$  = Potencia máxima =  $I_M V_M$   
 $FF$  = Factor de forma =  $P_M / (I_{SC} V_{OC})$   
 Eficiencia de conversión ó rendimiento  

$$\eta = \frac{P_M}{S \cdot G}$$
 $S$  = Área célula  
 $G$  = Irradiancia



$V < V_M$   
 $I = I_{SC} - V/R_P$     ó     $I = I_M$   
 $V \geq V_M$   
 $I = \frac{V_{OC} - V}{R_S}$

## RESUMEN DE CALCULOS A REALIZAR

### 1. Calculo del régimen de bombeo.

Será el volumen de agua necesario (l/día), entre el valor de insolación en horas pico por día (horas-pico/día), correspondientes al mes crítico.

Régimen de bombeo (l/h) = volumen de agua necesaria (l/día) / insolación del sitio (h-pico/día)

### 2. Calculo de la carga estática.

Es la suma del nivel estático medido desde el nivel del suelo hasta el espejo de agua cuando no opera una bomba, más el abatimiento medido desde el nivel estático al nivel del agua cuando opera una bomba, con frecuencia este valor se obtiene con de pruebas realizadas durante el aforo, más la altura de descarga medida desde el nivel del suelo hasta el punto donde el agua es descargada.

Carga estática (m) = Nivel estático (m) + Abatimiento (m) + Altura de descarga (m).

---

### **3. Calculo del recorrido de tubería.**

Es la longitud total de las tuberías por donde pasa el agua, la cual es la suma de la carga estática más el recorrido adicional de la tubería que es el resto de la tubería no incluida en el cálculo de la carga estática, se toma en cuenta la distancia vertical desde el abatimiento hasta la posición de la bomba, así como las distancias horizontales del recorrido de la tubería.

Recorrido total de tubería (m) = carga estática (m) + recorrido adicional de tubería (m)

### **4. Calculo de la carga por fricción.**

Es la compensación de las perdidas por fricción causadas por el paso del agua por la tubería rugosa, la cual viene a ser el producto del recorrido total de tubería multiplicado por el factor de fricción el cual es la presión causada por la fricción del agua al pasar por las tuberías. Puede calcular se de varias maneras como se detalló anteriormente, si no se contara con suficiente información, se utiliza el valor por omisión de 2 % del largo de la tubería, expresado como 0.02.

Carga por fricción (m) = Recorrido total de tubería (m) x Factor de fricción (decimal)

### **5. Calculo de la carga dinámica total.**

Es la suma de la carga causada por la fricción y la carga estática

Carga dinámica total (m) = carga por fricción + carga estática (m)

---

## 6. Calculo de la energía hidráulica

Es el cálculo de la energía necesaria para elevar el agua el cual viene a ser el producto del volumen de agua necesario por la carga dinámica total todo esto entre el factor de conversión de 367 l-m/ Wh el cual se usa para calcular la energía en (watts – hora) energía necesaria para levantar un litro de agua a una distancia de un metro.

Energía hidráulica (Wh/día) = (volumen de agua necesaria (l/día) x carga dinámica total (m)) / 367 (l-m/día)

## 7. Calculo de la energía del arreglo fotovoltaico

Es la división de la energía hidráulica entre la eficiencia de la bomba, en donde la eficiencia de la bomba es la proporción de energía eléctrica transformada a energía hidráulica. Los rendimientos diarios varían con la altura dinámica total, la insolación solar y el tipo de bomba esta información se obtiene en publicaciones del fabricante. Si no dispone de esta información, se usa valores por omisión presentados a continuación

<i>Carga dinámica total (m)</i>	<i>Tipo de sistema de bombeo</i>	<i>Eficiencia (%)</i>
5	Centrifuga de superficie	25
20	Centrifuga de superficie	15
20	Centrifuga sumergible	25
20 a 100	Centrifuga de paso múltiple	35
50 a 100	Desplazamiento positivo	35
Mas de 100	Desplazamiento positivo de palanca	45

---

Energía del arreglo fotovoltaico (Wh/día) = energía hidráulica (Wh/día) / eficiencia de la bomba (decimal)

## **8. Calculo de la carga eléctrica.**

Es el cálculo de la producción del arreglo fotovoltaico expresado en amperios-horas /día esto consiste en la división energía del arreglo fotovoltaico entre voltaje nominal del sistema.

Carga eléctrica (Ah/día) = Energía del arreglo fotovoltaico (Wh/día) / voltaje nominal del sistema (V).

## **9. Calculo de la carga eléctrica corregida**

Es la carga eléctrica requerida después de considerar las pérdidas para satisfacer la carga diaria.

Carga eléctrica corregida (Ah/día) = carga eléctrica (Ah/día) / factor de rendimiento del conductor (decimal)

## **10. Calculo de la corriente del proyecto.**

Es el cálculo de la corriente necesaria para satisfacer la carga del sistema del más crítico del diseño. Consiste en la división de la carga eléctrica corregida entre el mes de insolación más crítico o el mes de diseño

Corriente del proyecto (A) = Carga eléctrica corregida (Ah/día) / Insolación (horas-pico/día)

---

## 11. Cálculo de la corriente ajustada del proyecto

Es el cálculo de la corriente mínima del arreglo necesaria para activar el sistema de bombeo a partir de la operación de la corriente del proyecto entre el factor de reducción del módulo. Los módulos fotovoltaicos pierden eficiencia debido a las condiciones de trabajo en el campo. Esto se debe al efecto de temperatura, degradación con el tiempo polvo en la superficie, cargas desiguales y algunas condiciones más. Suponga un 95 % de eficiencia en los módulos cristalinos y un 70 % en módulos amorfos.

Corriente ajustada del proyecto (A) = corriente del proyecto (A) / factor de reducción del módulo (decimal)

## 12. Cálculo de módulos en paralelo.

Este cálculo proporciona el número de módulos que irán conectados en paralelo. Muy importante si el valor encontrado no es un número entero, anote el número entero inmediatamente mayor, otra opción es buscar un módulo con diferente  $I_{mp}$ .

Donde  $I_{mp}$  es la corriente a máxima potencia proporcionada por el fabricante del módulo fotovoltaico.

Módulos en paralelo = corriente ajustada del proyecto (A) / corriente  $I_{mp}$  del módulo (A)

## 13. Cálculo de los módulos en serie

Es el cálculo del número de módulos conectados en serie necesarios para producir la tensión del sistema. Muy importante si el valor encontrado no es un número entero, anote el número entero inmediato superior. Consiste en la división del voltaje nominal del sistema entre el voltaje  $V_{mp}$  del módulo de la información del fabricante.

Módulos en serie = voltaje nominal del sistema (V) / voltaje  $V_{mp}$  del módulo (V)

---

## 14. Cálculo del número total de módulos fotovoltaicos

Es el producto del número de módulos en paralelo por el número de módulos en serie.

Asegúrese que sea un número entero múltiplo del número de módulos en paralelo.

Total de módulos = módulos en serie x módulos en paralelo

## 15. Cálculo del tamaño del arreglo.

Es el cálculo de la potencia del arreglo fotovoltaico a partir del producto de total de módulos por corriente  $I_{mp}$  del módulo por voltaje  $V_{mp}$  del módulo.

Tamaño del arreglo fotovoltaico (w) = total de módulos x  $I_{mp}$  (A) x  $V_{mp}$  (V)

## 16. Cálculo del agua bombeada.

Es el cálculo de la cantidad de litros de agua bombeada en un día con este. Es el producto de módulos en paralelo por corriente  $I_{mp}$  por voltaje nominal del sistema por el factor de rendimiento del sistema por factor de conversión por la insolación del sitio por el factor de reducción del módulo todo esto entre la carga dinámica total.

Agua bombeada (l/día) = (módulos en paralelo x  $I_{mp}$  (A) x  $V_{nominal}$  sist x factor de rendimiento del sistema x factor de conversión x insolación (h-pico/día) x factor de reducción del módulo) / carga dinámica total (m)

## 17. Cálculo del régimen de bombeo.

Es la división del agua bombeada entre la insolación del sitio mes crítico

Régimen de bombeo (l/h) = agua bombeada (l/día) / Insolación del sitio (h-pico/día)

### CALCULO DE CARGA DE BOMBEO DE AGUA

				Factor de conversion	367	l-m/ Wh			
Volumen de agua necesaria	Insolacion del sitio	Regimen de Bombeo		Factor de friccion	2%				
				voltaje nominal	24				
1800	5,00	360,0000		Eficiencia de Bomba	0,35				
				Factor de Rendimiento del Conductor	0,95				
Nivel estatico (m)	abastecimiento (m)	altura de descarga (m)	carga estatica (m)	recorrido (m) adicional tuberia	recorrido total tuberia (m)	factor de friccion	carga por friccion (m)	carga estatica(m)	carga dinamica total (m)
23	1	8,2	32,2	1,2	33,4	2%	0,668	32,2	32,87
volumen agua necesario x dia (L/dia)	carga dinamica total (m)	factor de conversion	energia Hidraulica (Wh/dia)	eficiencia de la bomba	energia del arreglo FV(Wh/dia)	Voltaje nominal del sistema (24v)	carga electrica Ah/dia		
1800	32,87	367	161,21	0,35	460,59	24,00	19,19		
			Carga electrica (Ah/dia)	Factor rendimiento del conductor	Carga electrica corregida Ah/dia	Insolacion del sitio (h-pico/dia)	corriente del proyecto (A)		
			19,19	0,95	20,20	5,00	4,04		

**DIMENSIONAMIENTO DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO**

**INFORMACION DEL  
MODULO FOTOVOLTAICO**

Marca	
Modelo	
Vmp	16,9
Imp	4,14
Voc	21,5
Isc	4,35

Corriente del Proyecto (A)	Factor de Reduccion Modulo	Corriente Ajustada del Proyecto (A)	Corriente Imp del modulo (A)	Modulos en paralelo
4,04	0,95	4,25	4,14	2

Voltaje Nominal del sistema (V)	Voltaje Vmp del modulo(V)	Modulos en serie	Modulos en Paralelo	Total de modulos	Corriente Imp del modulo(A)	Voltaje Vmp del modulo(V)	Tamaño del arreglo FV(W)
24	16,9	2	2	4	4,14	16,9	280

Factor de reduccion modulo	0,95
Factor de rendimiento del sistema	0,35

Inclinacion del panel      10 Grados



---

## X. Conclusiones

- Los sistemas de bombeo solar son flexibles respecto a las motobombas convencionales, ya que una misma bomba puede aumentar su capacidad si se aumenta el número de módulos fotovoltaicos, hasta ciertos límites dependiendo de los componentes del sistema, entre los cuales se pueden nombrar, los límites estructurales (para soportes de módulos) y el calibre de los conductores eléctricos. Se estima que el tiempo de vida de los componentes de la electro bomba es de 5 a 10 años dependiendo de la tecnología y en el caso de una instalación con energía solar el tiempo de vida es de 20 años
- La instalación de paneles de energía fotovoltaica son un sistema de amplias perspectivas de aplicación en el ámbito rural.
- Los sistemas de bombeo de agua con energía solar requieren de una alta inversión inicial, pero el costo de mantenimiento y operación es muy bajo, en contraste con los sistemas que utilizan combustible, donde su inversión inicial es baja y un alto costo de operación y mantenimiento.
- Existen beneficios asociados con los sistemas de bombeo fotovoltaicos, uno de ellos es el tiempo ahorrado por el productor durante la operación y mantenimiento del sistema. Por ejemplo, los sistemas fotovoltaicos operan automáticamente encendiendo el equipo cuando el sol aparece en el horizonte y apagándose al atardecer.

- 
- Por otro lado, la conservación del medio ambiente y el entorno ecológico para nuestros hijos y los hijos de nuestros hijos, tengan asegurado un futuro sano.
  - Por otro lado la larga vida útil y alta confiabilidad. La vida útil de un panel fotovoltaico se estima alrededor de 20 años y durante ese periodo el porcentaje de fallas es extremadamente bajo, lo que hace un sistema de alta confiabilidad.
  - Es muy importante concentrar esfuerzos de difusión de sistemas solares es aquellas para captar una mayor aceptación social y buen desempeño técnico.
  - Por la parte ambiental la energía solar es una fuente renovable. Durante la operación del generador fotovoltaico no se verifican emisiones, como gases causantes del efecto invernadero.

---

## **XI. Bibliografía**

1. Nassir Sapag Chain . Preparación y Evaluación de Proyectos. 2da Edición.
2. Roberto Hernández Sampieri. Metodología de la Investigación. Editorial, MCGRAW HILL.
3. Manual de Bombeo GRUNDFOS INDUSTRY
4. Guía de la Energía Solar. Dirección General de industria, energía y minas. COMUNIDAD MADRID.
5. Héctor Gasquet. Manual teórico y práctico sobre los sistemas fotovoltaicos. SOLARTRONIC S.A de CV. Morelos México
6. [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/dim\\_instructions.html#top](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/dim_instructions.html#top)
7. - “Fuentes renovables de energía para sistemas de abastecimiento de agua” primera edición Hofkes E. H. 1990
8. - “Bombeo Fotovoltaico” primera edición Orellana R. 1989
9. Castro Gil MANUEL. “Sistemas de bombeo Eólicos y Fotovoltaicos. PROGENSA 2003.
10. - Tobaja Vazquez MANUEL. Energía solar fotovoltaica. CEYSA.
11. - [www.censolar.es](http://www.censolar.es)
12. - [www.managenergy.net](http://www.managenergy.net)
13. - [www.energiasostenible.org](http://www.energiasostenible.org)