

---

**Aplicación de la  
energía solar  
fotovoltaica  
a sistemas de  
bombeo de agua**

---

**unidad  
didáctica 6**



## **1. Aplicaciones**

---

El agua es una necesidad básica, por eso, en los lugares aislados o de difícil acceso en los que es complicado o muy caro establecer un suministro de corriente eléctrica mediante una red convencional, las energías alternativas, entre ellas la energía solar FV constituyen una opción muy interesante cuando se trata de poder disponer de este bien para su consumo.

El bombeo solar de agua se establece como una solución acertada en países en desarrollo, que no disponen de una infraestructura eléctrica que permita alimentar las bombas extractoras y que tampoco disponen de combustibles para hacer funcionar generadores eléctricos. En estas zonas, pequeños sistemas de bombeo solar pueden facilitar la vida a familias con escasos recursos.

En los países desarrollados, en los que las instalaciones agrícolas disponen de acceso a redes de electrificación, la energía solar fotovoltaica solo se aplica cuando la electricidad se necesita en lugares alejados de las redes eléctricas y de las instalaciones electrificadas de las explotaciones, como por ejemplo, en sistemas de redes por goteo, en vallas electrificadas para el control del ganado o en abrevaderos instalados en las dehesas:

- **Abrevado de ganado:** sobre todo en regiones ganaderas extensas, como en América, Australia y Sudáfrica donde las fuentes de agua están dispersas en amplias áreas en las cuales las líneas eléctricas son escasas o inexistentes, y los costos de transporte y mantenimiento son altos. Algunos ganaderos usan las bombas solares para distribuir el agua a lo largo de

## Energía solar fotovoltaica

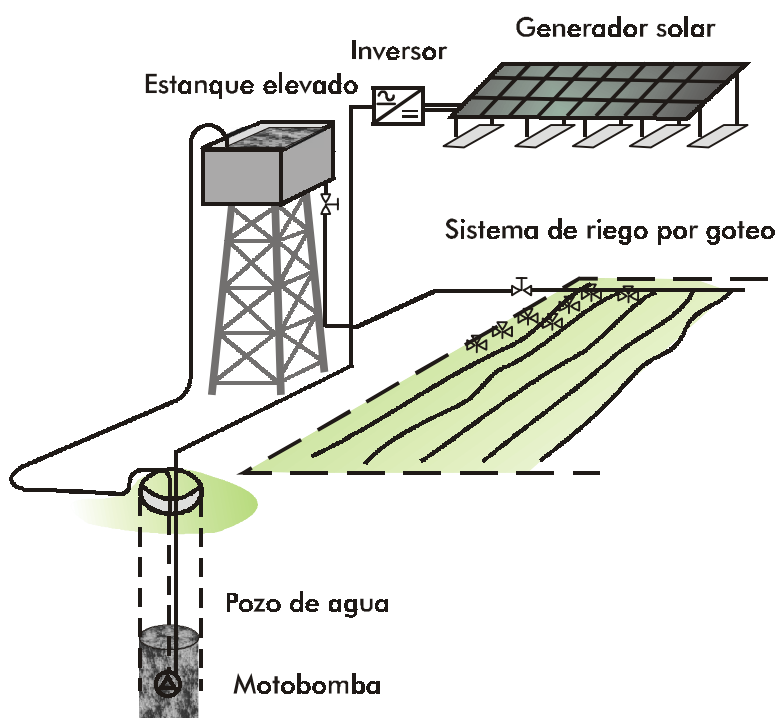
### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

varios kilómetros (hasta 5 km) de tuberías. Otros usan sistemas portátiles, llevándolos de una fuente de agua a otra.



- **Irrigación:** las bombas solares se usan en granjas pequeñas, huertos, viñedos y jardines. Es más económico el bombeo FV directo (sin baterías), almacenar agua en un tanque, y distribuirla por flujo de gravedad. Donde se requiera agua a una presión más elevada, las baterías de almacenamiento estabilizan el voltaje para distribución y flujo consistentes, y podría eliminar la necesidad de un tanque de almacenamiento.



- **Agua para uso doméstico:** las bombas solares suministran así agua para viviendas, villas, clínicas, etc. Una bomba de agua puede alimentarse con su propio panel FV, o a través de un sistema principal que alimente las luces y los electrodomésticos. Puede usarse un tanque de almacenamiento elevado, o una segunda bomba llamada bomba impulsora, la cual puede suministrar presión de agua. O, el sistema principal de baterías puede suministrar el almacenamiento en lugar de un tanque. Para diseñar un sistema, es importante tener una idea general de las necesidades y considerar todos los recursos.

La forma más efectiva de minimizar el costo del bombeo solar es minimizando la demanda de agua a través de la conservación. La irrigación por goteo, por ejemplo, puede reducir el consumo a menos de la mitad que con los métodos tradicionales. En los hogares, los sanitarios con bajo consumo de agua pueden reducir el uso doméstico total a la mitad. La eficiencia en el uso del agua es una consideración primaria en la concepción del bombeo solar.

Las ventajas de la energía solar para bombeo de agua hacen de este sistema el más idóneo para dicha función:

- El periodo de mayor radiación solar coincide con el periodo de mayor necesidad de riego.
- Extrae el agua sin gastos energéticos y no requiere apenas mantenimiento.
- Funciona con total fiabilidad y de una forma especialmente cómoda para el usuario.
- No emite ninguna contaminación al medio.
- Existen ayudas para la energía solar por parte de la Administración.
- No dependen de la existencia de una red distribuidora de energía eléctrica para ser puestos en funcionamiento, ni de generadores eléctricos portátiles que consumen combustibles que contaminan el medio ambiente y resultan caros.
- Su diseño es simple, ya que no requieren un banco de baterías (uso diurno).

## **Energía solar fotovoltaica**

### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

- Sistemas de bombeo para profundidades moderadas pueden ser transportados y así usarse en más de un punto.
- Las bombas modernas pueden operar a grandes profundidades y son más duraderas y eficientes.
- Pueden emplearse como complemento a un sistema de bombeo mediante aerogeneradores, cuando éstos dejan de funcionar por falta de viento.

Aunque también tiene sus desventajas:

- El volumen extraído por hora es menor que el que se puede obtener con una bomba accionada por un generador accionado con un combustible fósil. El criterio de diseño para un equipo de bombeo solar sólo considera el volumen diario requerido, como se verá más adelante.
- El coste inicial del sistema es alto, debido al coste de los paneles. Sin embargo, la sencillez del mismo y la duración de las nuevas bombas, permiten la amortización del costo de un sistema solar en tiempos relativamente cortos.
- Necesita un tanque de acumulación para compensar por los días con radiación solar baja o nula.

## **2. Componentes del sistema**

---

Los principales componentes de un sistema de bombeo fotovoltaico son:

- Los **paneles fotovoltaicos**, que constituyen la base del sistema generador.
- Los **reguladores e inversores** necesarios, dependiendo del tipo de instalación.
- Las **baterías** para la acumulación de energía eléctrica en el caso de que el bombeo no se haga directamente.
- El **motor**, que puede ser de corriente alterna o continua.
- La **bomba**, que puede ser de distintos tipos.
- Otros componentes: **tuberías, válvulas, depósitos de almacenamiento**, y en el caso de instalaciones de riego, elementos de aplicación del agua, como **goteros o aspersores**.

En este punto hay que distinguir entre los **sistemas de bombeo directo** y los **sistemas de bombeo con acumulación eléctrica**.

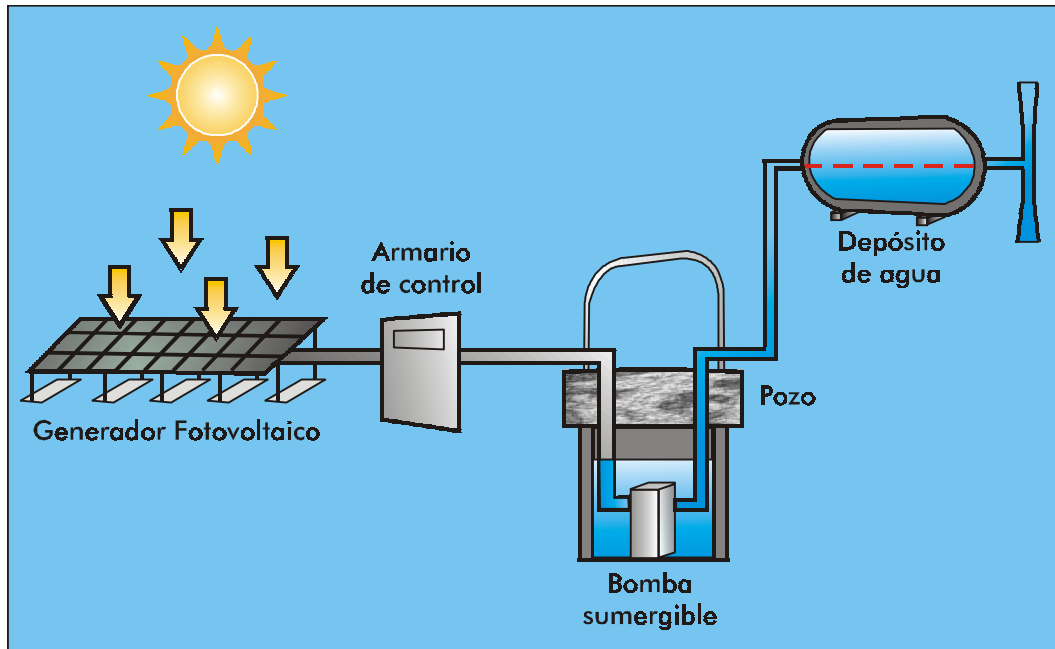
El **sistema de bombeo solar directo** responde a un esquema de funcionamiento es muy sencillo. Se trata de un sistema compuesto básicamente por: un grupo de paneles fotovoltaicos, un regulador de bombeo y una bomba de agua. El agua se extrae del pozo durante el tiempo de radiación solar únicamente, almacenándose en un depósito, para su posterior uso cuando sea necesario. Se eliminan el regulador y las baterías, sustituyéndose el inversor por otro más barato. Esto reduce el precio de la instalación y su mantenimiento. A cambio solo se puede bombear durante el día, por lo que en algunas instalaciones es necesario almacenar el agua en un depósito, que haría la función de la batería. Si además el sistema de bombeo directo utiliza una bomba de desplazamiento positivo el rendimiento

## Energía solar fotovoltaica

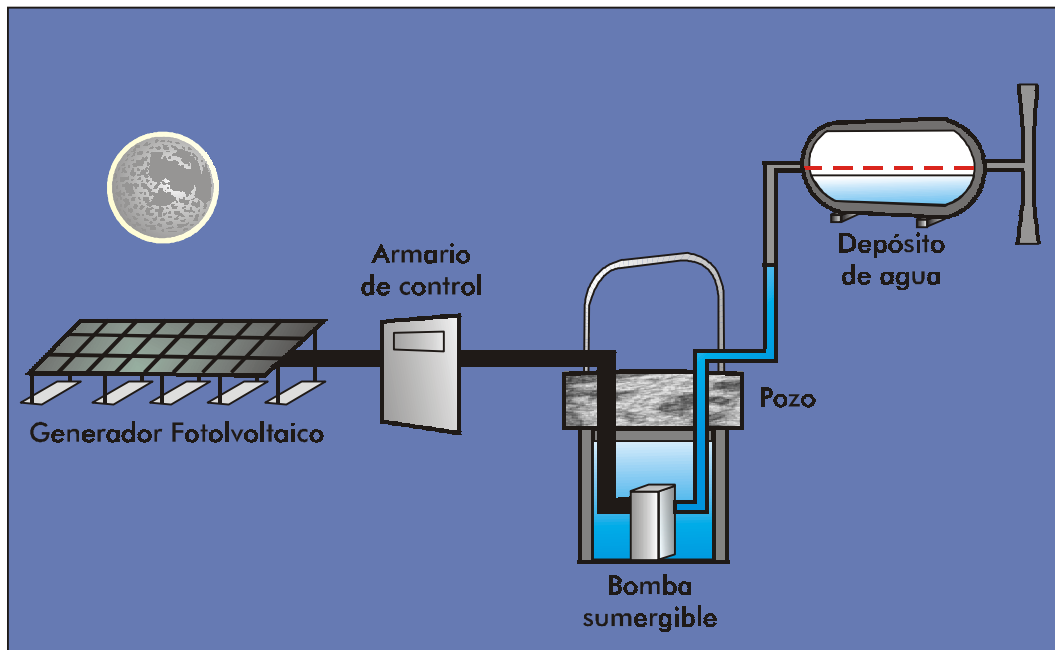
Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

energético es casi el doble que el de un bombeo convencional, reduciéndose los paneles necesarios y el precio de la instalación, a pesar de que la bomba es más cara.



Abastecimiento de agua



Abastecimiento de agua

Este sistema permite prescindir completamente de cualquier tipo de batería o acumulador. Consiguiendo un sistema mucho más eficiente y barato. Si en cierto momento sobra agua, la mejor solución suele ser almacenarla en un depósito para usarla posteriormente.

Si las necesidades de extracción de agua son muy precisas o se necesita asegurar el suministro, pueden instalarse baterías para los periodos sin sol. El **sistema de bombeo solar con acumulación eléctrica** está compuesto por: paneles, regulador, baterías, inversor (si es de alterna) y la bomba.

El sistema generador FV, compuesto por módulos o paneles solares y sus accesorios, debe diseñarse de forma que la aportación solar que reciba, garantice la obtención de una cantidad de energía eléctrica suficiente para hacer funcionar la bomba de forma que proporcione un suministro de agua que se adapte a las necesidades que se ha propuesto cubrir con este sistema de bombeo. El resto de componentes que intervienen, o pueden intervenir, en la instalación de bombeo solar, debe también reunir las condiciones adecuadas para su correcto funcionamiento.

## 2.1. Reguladores e inversores

Los **reguladores** de tensión interesantes son los convertidores CC/CC, que pueden instalarse con baterías o sin ellas y permiten hacer un seguimiento del punto de máxima potencia consiguiendo maximizar en todo momento la potencia captada. También permiten aumentar la intensidad de corriente producida a cambio de reducir la tensión haciendo posible que las bombas volumétricas, accionadas con motores de CC, que exigen una intensidad directamente proporcional a la altura manométrica, puedan funcionar con niveles luminosos bajos, manteniendo prácticamente constante su rendimiento. Cuando no se utilizan estos convertidores, este tipo de bombas tiene un rendimiento medio muy bajo, aunque como alternativa al empleo de convertidores CC/CC se podría recurrir a un fraccionamiento de la potencia utilizando varias bombas.

Cuando se quieren utilizar motores de corriente alterna se hace necesario el uso de **inversores**. Alimentados con corriente continua, suministran a su salida corriente alterna monofásica o trifásica, pudiendo en algunos casos modificar la frecuencia para adaptar el régimen de funcionamiento del motor al nivel de

irradiancia de cada momento. Existen grupos de motor-bomba de corriente alterna que integran un inversor dentro de su carcasa y pueden conectarse directamente a los paneles fotovoltaicos.

## 2.2. Baterías

Entre las posibilidades de acumulación de la energía fotovoltaica, el empleo de **baterías** es la más frecuente, aunque, cuando se trate de instalaciones de bombeo, siempre es más interesante (y económica) la acumulación en depósitos adecuados del agua bombeada, ya que después de cinco o siete años, las baterías necesitan reemplazarse, mientras que un tanque de almacenamiento bien construido dura décadas.

La acumulación de energía eléctrica en baterías será necesaria cuando el rendimiento máximo del pozo durante las horas de sol es insuficiente para cubrir la demanda; en ese caso, habría que continuar bombeando cuando un hubiera sol, para lo que será necesario disponer de la energía eléctrica acumulada en las baterías, aunque se puede recurrir a alternativas (como hacer otro pozo o ampliar el existente), que a largo plazo podrían ser más económicas.

El empleo de baterías obliga a instalar un *regulador de tensión* cuya misión es principalmente impedir que las baterías se sobrecarguen o que sufran descargas muy profundas que las dañan, llegando incluso a destruirlas.

Aparte de actuar como almacenamiento de energía, las baterías pueden tener funciones de regulación de tensión, permitiendo un mejor acoplamiento del sistema generador del grupo motor-bomba al mantener constante la tensión de alimentación. En cualquier caso, la acumulación en baterías implica pérdidas de energía además de exigir un mantenimiento regular y por ello, los sistemas de bombeo directo, sin baterías, son habitualmente la solución más interesante.

La introducción de baterías en un sistema de bombeo FV podría reducir su confiabilidad e incrementar sus requerimientos de mantenimiento. En general no se recomienda utilizar baterías en sistemas de bombeo fotovoltaico.

Aún cuando las baterías pudieran parecer buena idea, tienen muchas desventajas en los sistemas de bombeo. Reducen la eficiencia total del sistema. El voltaje de operación de los módulos solares es fijado por el banco de baterías y es sustancialmente menor que los niveles que alcanzan operando la bomba directamente.

Las baterías requieren también de mantenimiento adicional y protección de baja y sobrecarga en los sistemas de circuitos, lo que incrementa el costo y complejidad de un sistema de bombeo determinado. Por estas razones, solamente del orden un 5% de los sistemas de bombeo solar utilizan un banco de baterías.

### **2.3. Motor**

Un **motor** es un sistema que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. El motor acciona la bomba. La selección de un motor depende de su rendimiento, disponibilidad, confiabilidad y costos. Los motores que se precisan en aplicaciones de bombeo fotovoltaico deben ser de pequeña potencia y tener rendimientos más elevados que los utilizados habitualmente y por ello resultan más costosos. Comúnmente en aplicaciones FV se usan dos tipos de motores: de corriente continua, CC (de imán permanente y de bobina) y de corriente alterna, CA.

Debido a que los generadores FV proporcionan potencia en CC, los motores de CC pueden conectarse directamente, mientras que los motores de CA deben incorporar un inversor CC/CA. Las necesidades de potencia en vatios pueden usarse como guía general para la selección del motor.

Los **motores de CC de imán permanente**, tienen escobillas que se van desgastando, lo que obliga a realizar un mantenimiento periódico que consiste en el reemplazo de las mismas, aunque un aumento del número de escobillas reduce sensiblemente su desgaste. Los motores con escobillas no se adaptan al uso con bombas sumergidas ya que requieren un mantenimiento regular. Son sencillos y eficientes para cargas pequeñas.

Los **motores de CC de campos bobinados** (sin escobillas) tienen imanes permanentes en el rotor y el inducido se encuentra en el estator, que es conmutado electrónicamente. Aunque son motores sin escobillas, el mecanismo electrónico que las sustituye puede significar un gasto adicional y un riesgo de avería. La

ventaja de estos motores es que pueden operar sumergidos, reduciéndose la necesidad de mantenimiento al no tenerse que reemplazar las escobillas. Se utilizan en aplicaciones de mayor capacidad ya que requieren de poco mantenimiento.

Las principales ventajas de los motores de CC son sus rendimientos elevados, que no necesitan inversor y que se adaptan bien para su acoplamiento directo al generador fotovoltaico aunque, en general, son más costosos que los motores de CA y es difícil encontrarlos de grandes potencias.

Los **motores de CA** están más extendidos, siendo más fácil encontrarlos en potencias mayores, para los que son más apropiados. Son más baratos que los de CC pero como obligan a la instalación de un sistema inversor CC/CA, esto se agrega a los gastos iniciales y gastos puntuales de mantenimiento, y a dispositivos que permitan proporcionar o reducir las altas corrientes que suelen requerir en el arranque, lo cual encarece el sistema FV. Los sistemas de CA son ligeramente menos eficientes que los sistemas CC debido a las pérdidas de conversión. Los motores de CA pueden funcionar por muchos años con menos mantenimiento que los motores CC.

## 2.4. Bomba

La **bomba** es la máquina que transforma la energía mecánica en energía hidráulica. La potencia que producen los módulos FV es directamente proporcional a la de la radiación solar disponible. Es decir, a medida que el sol cambia su posición durante el día y al variar la disponibilidad de potencia, también cambia la disponibilidad de potencia para la bomba. Sin embargo, las bombas comunes disponibles en el mercado han sido desarrolladas pensando en que hay una fuente de potencia constante. Por esta razón se han creado algunas bombas especiales para la electricidad fotovoltaica.

Las bombas pueden clasificarse según su forma de instalación, en tres grandes grupos:

- Sumergibles.
- Flotantes.

- De superficie.

Las bombas **sumergibles** son apropiadas para pozos de poco diámetro donde las variaciones de nivel son importantes y la acumulación de agua se hace en altura. Las **flotantes** se instalan en ríos, lagos o pozos de gran diámetro permitiendo una altura de aspiración constante y proporcionando un gran caudal con poca altura manométrica. Las bombas **de superficie** se instalan en aquellos lugares en los que los niveles del agua de aspiración no sufren grandes oscilaciones permaneciendo la altura de aspiración dentro del rango admitido por la bomba, generalmente menor de 6 m.

Desde el punto de vista mecánico, se pueden distinguir dos tipos principales de bombas:

- Bombas de desplazamiento positivo, o volumétricas.
- Bombas dinámicas o de intercambio de cantidad de movimiento.

### **2.4.1. Bombas de desplazamiento positivo, o volumétricas**

Las bombas de desplazamiento positivo, o volumétricas, poseen una cavidad cuyo volumen varía como consecuencia del movimiento de una parte móvil, obligando al líquido que las llena a moverse en un sentido determinado. Podemos encontrar bombas *volumétricas de cilindro y de diafragma*.

Las más usadas en bombeo fotovoltaico son las bombas que usan un cilindro y un pistón para poder mover paquetes de agua a través de una cámara sellada, que son apropiadas para alturas manométricas elevadas y bajos caudales. El otro tipo de bombas utiliza un pistón con diafragmas. Cada ciclo mueve una pequeña cantidad de líquido hacia arriba. El caudal es proporcional al volumen de agua. Esto se traduce en un funcionamiento eficiente en un amplio intervalo de cargas dinámicas.

Cuando la radiación solar aumenta también aumenta la velocidad del motor y por lo tanto el flujo de agua bombeada es mayor.

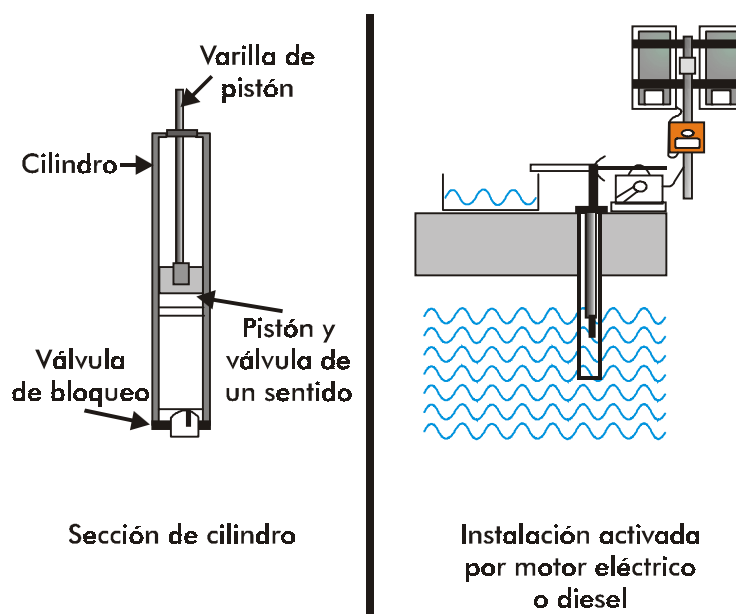
## Energía solar fotovoltaica

### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

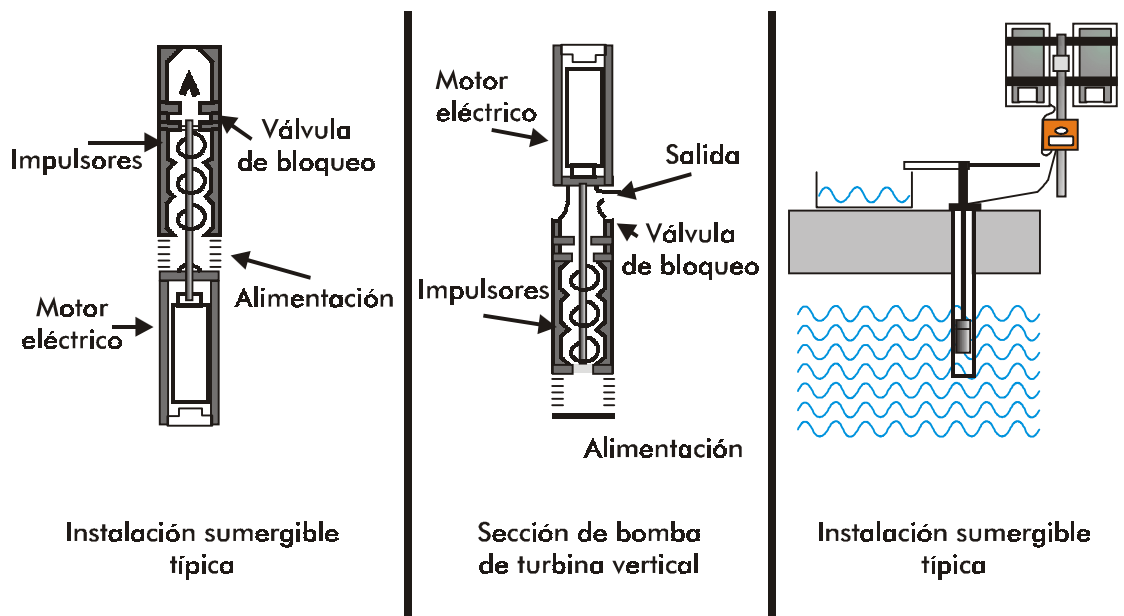
#### Bombas de cilindro

Su principio consiste en que cada vez que el pistón baja, el agua del pozo entra a su cavidad y cuando éste sube, empuja el agua a la superficie. La energía eléctrica requerida para hacerla funcionar se aplica sólo durante una parte del ciclo de bombeo. Las bombas de esta categoría deben estar siempre conectadas a un controlador de corriente para aprovechar al máximo la potencia otorgada por el generador fotovoltaico.



#### Bombas de diafragma

Las bombas de diafragma desplazan el agua por medio de diafragmas de un material flexible y resistente. Comúnmente los diafragmas se fabrican de caucho reforzado con materiales sintéticos. En la actualidad, estos materiales son muy resistentes y pueden durar de dos a tres años de funcionamiento continuo antes de requerir reemplazo, dependiendo de la calidad del agua. Existen modelos sumergibles y no sumergibles.



Las bombas de diafragma son económicas, pero cuando se instala una bomba de este tipo siempre se debe considerar el gasto que representa el reemplazo de los diafragmas. Más aún, muchas de estas bombas tienen un motor de corriente continua con escobillas, las cuales también deben cambiarse periódicamente. Los juegos de reemplazo incluyen los diafragmas, escobillas, empaques y sellos. La vida útil de este tipo de bomba es aproximadamente 5 años del uso.

### 2.4.2. Bombas dinámicas o de intercambio de cantidad de movimiento

Las bombas dinámicas transfieren al fluido una cantidad de movimiento mediante paletas o álabes giratorios, siendo las más utilizadas las centrífugas, que se diseñan para caudales generalmente mayores que las bombas volumétricas. Tienen

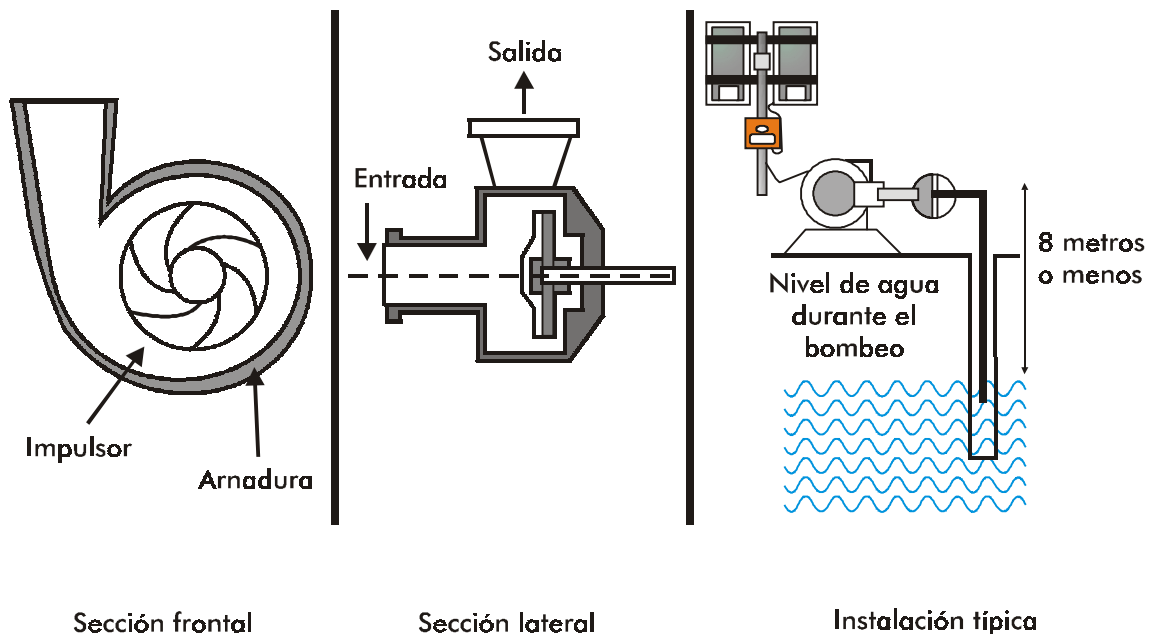
## Energía solar fotovoltaica

### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

un impulsor que por medio de la fuerza centrífuga de su alta velocidad arrastran agua por su eje y la expulsan en dirección radial. Estas bombas pueden ser sumergibles o de superficie. No son recomendables para alturas de aspiración mayores de 5 ó 6 metros y pueden tener uno o varios cuerpos dependiendo de la altura de impulsión necesaria. Son capaces de bombear el agua a 60 metros o más, dependiendo del número y tipo de impulsores.

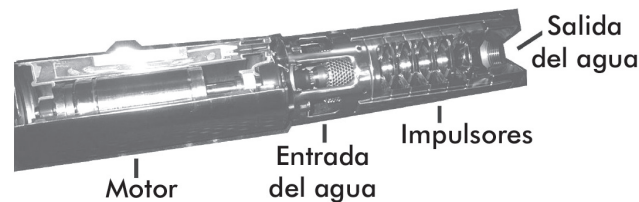
Si se trata de bombas de succión superficial, se instalan a nivel del suelo. Este tipo de bombas tiene la ventaja de que se pueden inspeccionar y ser sometidas a mantenimiento fácilmente. No trabajan adecuadamente si la profundidad de succión excede los 8 m.



Hay también una gran variedad de bombas centrífugas sumergibles. Algunas de estas bombas tienen el motor acoplado directamente a los impulsores y se sumergen completamente.

Otras, tienen el motor en la superficie mientras que los impulsores se encuentran completamente sumergidos y unidos por un eje. Generalmente las bombas centrífugas sumergibles tienen varios impulsores.

Todas las bombas sumergibles están selladas para evitar que el aceite de lubricación pueda escapar y contamine el agua. Otras bombas utilizan el agua misma como lubricante. Estas bombas no deben trabajar en seco ya que se sobrecalentarían.



En las bombas centrífugas el caudal varía proporcionalmente con la velocidad de giro; el par y la altura manométrica varían proporcionalmente al cuadrado de la velocidad y la potencia lo hace linealmente con el cubo de la misma. En cuanto al rendimiento, éste disminuye con la velocidad de giro conforme nos alejamos de los valores de altura y caudal para los que han sido diseñadas, motivo por el cual también puede resultar interesante un fraccionamiento de la potencia mediante el empleo de varias bombas. Los rendimientos suelen ser elevados para alturas manométricas inferiores a 25 m y por ello, para mayores alturas, se suele recurrir al empleo de bombas multiestado que están formadas por varios rodetes adyacentes dispuestos en serie. Las bombas centrífugas reúnen una serie de ventajas entre las que cabe destacar su simplicidad, con pocas partes móviles, su bajo coste, su robustez y que exigen un par de arranque pequeño.

### **2.4.3. Selección de la bomba**

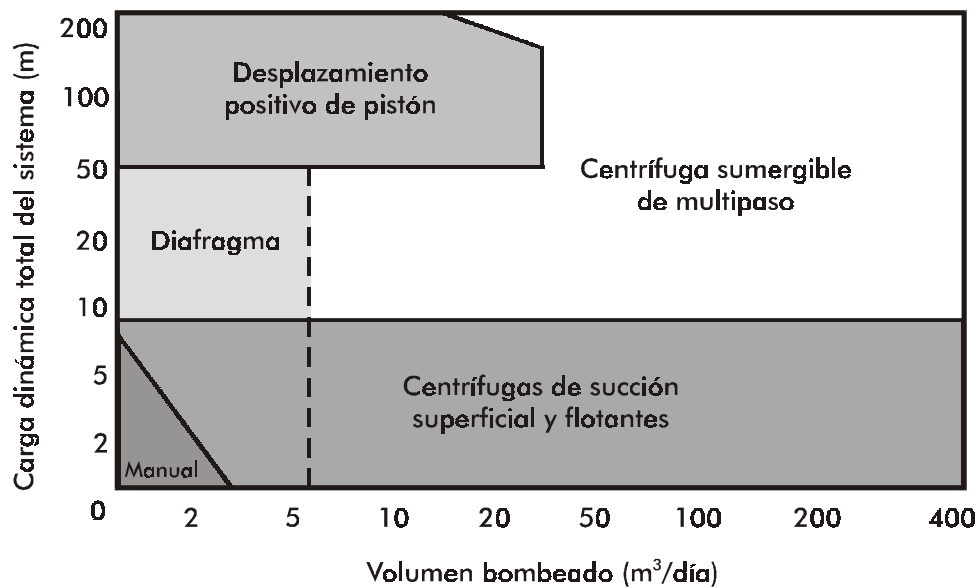
Las bombas centrífugas y volumétricas ofrecen diferentes alternativas para diferentes rangos de aplicación. El proceso de selección de la bomba para un proyecto es de suma importancia. Todas las bombas tienen que usar la energía eficientemente ya que en un sistema FV, la energía cuesta dinero. El proceso de selección de una bomba es complicado debido a la multitud de marcas y características de cada bomba. Un solo fabricante puede ofrecer más de 20 modelos de bombas y cada una tiene un rango óptimo de operación.

## Energía solar fotovoltaica

### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

Las bombas más eficientes son las de desplazamiento positivo de pistón, pero no son recomendables para gastos medianos y grandes a baja carga dinámica total. Por ejemplo, una bomba de palanca puede llegar a tener una eficiencia de más de 40%, mientras que una bomba centrífuga puede tener una eficiencia tan baja como 15%. La figura siguiente indica el tipo de bomba adecuada que se recomienda en general según la carga dinámica total del sistema de bombeo.



Intervalos comunes donde se aplican los diferentes tipos de bombas solares

La tabla siguiente presenta las ventajas y desventajas de las diferentes bombas utilizadas en el bombeo FV.

<b>PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS FOTOVOLTAICAS</b>		
<b>Bombas fotovoltaicas</b>	<b>Características y Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Centrifugas sumergibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comúnmente disponibles.</li> <li>- Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena.</li> <li>- Pueden utilizar el agua como lubricante.</li> <li>- Cuentan con motores de CC de velocidad variable o CA.</li> <li>- Operan a cargas dinámicas grandes.</li> <li>- Tienen un diseño modular que permite obtener más agua al agregar más módulos fotovoltaicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tienen un rango de eficiencia estrecho con respecto a la CDT.</li> <li>- Se dañan si trabajan en seco.</li> <li>- Deben extraerse para darles mantenimiento.</li> <li>- Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas.</li> </ul>
Centrifugas de succión superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comúnmente disponibles.</li> <li>- Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena.</li> <li>- Son de fácil operación y mantenimiento por ser superficiales.</li> <li>- Cuentan con motores de CC de velocidad variable o CA.</li> <li>- Manejan flujos altos.</li> <li>- Manejan cargas dinámicas altas, aunque no son capaces de succionar más de 8 metros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tienen un rango de eficiencia estrecho con respecto a la CDT.</li> <li>- Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas.</li> <li>- Pueden dañarse por el congelamiento en climas fríos.</li> </ul>
Desplazamiento positivo de pistón	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soportan cargas dinámicas muy grandes.</li> <li>- La producción puede variarse ajustando la carrera del pistón.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requieren de reemplazo regular de sellos del pistón.</li> <li>- No toleran arenas o sedimentos.</li> <li>- La eficiencia se reduce a medida que el pistón pierde la capacidad de sellar el cilindro.</li> <li>- Debe extraerse el pistón y el cilindro del pozo para reparar los sellos.</li> <li>- No dan grandes flujos.</li> </ul>
Diafragma	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operan a cargas menores de 40 metros.</li> <li>- Son muy económicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No toleran arenas o sedimentos.</li> <li>- No trabajan a cargas dinámicas grandes.</li> <li>- Bajos flujos.</li> </ul>

Para caracterizar las bombas se utilizan *curvas características* que relacionan el caudal con la altura manométrica que pueden suministrar para un régimen de revoluciones determinado.

## 2.5. Otros componentes

Otros componentes a destacar en los sistemas de bombeo fotovoltaico son las **tuberías**. Fabricadas en diversos materiales, siempre resistentes a la corrosión, sus principales características son el diámetro, la presión admisible máxima y la rugosidad, de la que dependen en gran medida las pérdidas de carga. Las pérdidas de carga bajan el rendimiento del sistema. Para evitarlas, hay que procurar que las tuberías tengan gran longitud o que sean de diámetro pequeño.

También son de importancia los **sistemas de unión**, que pueden consistir en bridas, uniones soldadas y pegadas. En la instalación de las tuberías no deberán olvidarse los problemas de dilatación debiendo recurrir a **juntas de dilatación** o a disposiciones que absorban dichas deformaciones. Las uniones deben soportar la presión del agua que trasiega por la tubería, así como, en la tubería de bajada, la presión de la columna de agua y la tensión provocada por el arranque de la bomba. Deben hacerlo de forma duradera sin que, con el paso del tiempo, lleguen a desarrollarse fugas. Las fugas reducen el rendimiento y en el caso de las bombas de superficie, provocan la pérdida de succión.

Las **válvulas** son elementos que permiten abrir o cerrar conducciones y pueden ser de accionamiento manual o automáticas. Estos elementos introducen pérdidas de carga que hay que tener en cuenta en el momento del cálculo de la instalación, al igual que las que provocan otros elementos como **codos**, **estrechamientos**, etc., por lo que su número debe ser reducido. Las válvulas de retención son importantes cuando se quiera evitar que el flujo del líquido se invierta y se suelen instalar a la salida de la bomba.

Las tuberías, las válvulas y los demás elementos se deben seleccionar para los caudales y las presiones de trabajo que tengan que soportar.

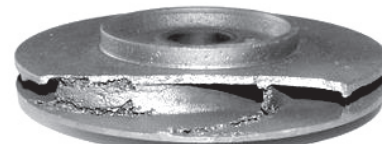
En las instalaciones deben evitarse los problemas de **cavitación** y los efectos destructivos de los **golpes de ariete** mediante dispositivos adecuados. La apertura

o cierre de forma progresiva y la instalación de calderines o torres de equilibrado protegen contra estos efectos.

### **Nota**

#### *– Cavitación*

Las partículas de agua pierden su presión atmosférica inicial a medida que se acercan a la bomba; al entrar en los álabes del rodete se produce en el mismo una nueva caída de presión. Si la presión resultante en algún punto es inferior a la presión de vapor del líquido se forman bolsas de vapor. Estas burbujas son arrastradas por el flujo y llegan a zonas donde la presión aumenta; allí se juntan bruscamente y el vapor se vuelve a condensar. Teniendo en cuenta que al vaporizarse el agua aumenta de volumen 1.700 veces, al condensarse disminuye de volumen en la misma proporción; en los espacios vacíos se precipita el agua que fluye a continuación golpeando contra la superficie de los álabes. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida. El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea en las diferentes partes de la máquina.



#### *– Golpe de ariete*

El golpe de ariete es un fenómeno causado por los cambios súbitos en la velocidad del flujo de agua, o por su interrupción repentina, cuando se cierra el grifo, por ejemplo, lo que provoca que se produzcan presiones al verse detenido el avance del líquido y genera ruidos y tensiones en las cañerías.

Estas vibraciones también pueden aparecer si se produce un desplazamiento brusco del aire que contienen las tuberías en su interior desde un tanque o tubería cerrados, que comienzan a verter líquido por su parte superior para contrarrestar la presión provocada. Por ello el agua tiende a desplazarse y puede provocar alguna avería al buscar una salida porque no puede ser contenida en las cañerías, debido a que el espacio que antes ocupaba se encuentra lleno de aire.

## Energía solar fotovoltaica

### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

Los **depósitos de almacenamiento** de agua permiten mantener cierta autonomía sin depender de la energía solar y para ello deberán dimensionarse en función de los consumos que se realicen fuera de las horas de sol y, en el caso de suministro de agua potable, considerando varios días de autonomía (al menos 3 ó 4) para cubrir la demanda en periodos de baja o nula insolación. También permiten cubrir demandas pico que no puedan ser suministradas por el sistema de bombeo y, en consecuencia, son aconsejables en estos casos por reducir la potencia necesaria. El almacenamiento a largo plazo destinado a riego, exige grandes depósitos que resultan costosos a no ser que ya se disponga de ellos. En su dimensionado se deberá tener en cuenta las variaciones en la altura manométrica que su llenado pueda ocasionar en el bombeo o en la distribución posterior y tendrán la resistencia adecuada para soportar el empuje del líquido. Deberán estar cubiertos si se quieren eliminar las pérdidas por evaporación así como la entrada de suciedad.



Antes de proceder al diseño de un sistema de bombeo a realizar desde un pozo, se deberá tener en cuenta que es preciso limitar el máximo caudal a aquel que el pozo pueda suministrar y por ello este caudal se deberá evaluar previamente.

En los riegos fotovoltaicos, los elementos de aplicación de agua más apropiados son los **goteros** de baja altura manométrica que permiten una aplicación eficiente del agua.

Existen además sistemas de bombeo independientes del sistema fotovoltaico como son el control del nivel en el depósito de almacenamiento, para impedir que éste

se desborde y el control del nivel de aspiración, para impedir el funcionamiento en los casos en que el nivel del agua descienda por debajo del permitido. Ampliamente usados, dada su simplicidad, son los controles de nivel de flotador y contrapeso (interruptores de flotación). En lo que se refiere al control automatizado del riego, éste se consigue mediante electroválvulas y autómatas programables que lo programan temporalmente o en función de los niveles de evaporación y transpiración que se hayan producido en los cultivos.

### **3. Uso de los sistemas típicos de bombeo fotovoltaico**

---

Como hemos visto, los sistemas de bombeo se pueden clasificar en función del tipo de bomba, centrífuga o de desplazamiento positivo, y por su lugar de ubicación, de superficie, flotante o sumergida. También pueden clasificarse según el motor utilizado, de CC o de CA, y dependiendo de si usan o no baterías. Las configuraciones más habituales son:

- Unidades motor-bomba instaladas en superficie con bombas centrífugas o de desplazamiento positivo.
- Motor-bomba flotante centrífuga.
- Motor-bomba sumergible de desplazamiento positivo.
- Motor-bomba sumergible centrífuga de uno o varios cuerpos.

En pozos de pequeño diámetro se emplean bombas volumétricas, situándose frecuentemente el motor en superficie para facilitar su mantenimiento. El pico de intensidad requerido para el arranque de este tipo de bombas, con alto par de arranque, puede ser proporcionado por un condensador, comenzando a funcionar, de esta forma, con unos niveles más bajos de irradiancia. También se emplean bombas centrífugas sumergidas.

Los motores CC con bombas centrífugas suelen conectarse directamente al generador. En pozos abiertos, en los que el nivel de agua se sitúa a menos de 30 m de profundidad, se pueden emplear bombas autoaspirantes que no necesitan cebado de la tubería de aspiración y al no ser sumergibles, se instalan a poca altura del nivel de agua pues su máxima altura de aspiración es de 4 m.

Mientras que los motores de CC se emplean para pequeñas potencias, los motores de CC se emplean cuando las potencias comienzan a ser más elevadas y por lo general, acoplados a bombas centrífugas de uno o varios cuerpos. En estos casos se requiere un inversor que puede tener incorporado un variador de frecuencia que permitirá regular la velocidad de giro del motor y, de esta forma, poder hacer un mejor aprovechamiento de la potencia disponible.

## 4. Diseño y dimensionado de un sistema fotovoltaico

---

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 eligen 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 tendiendo en cuenta que las pérdidas de carga en las mismas no deben superar un 10%.

### 4.1. Necesidades de energía hidráulica, necesidades de agua y altura manométrica

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 consumo continuo, como es el abastecimiento de agua potable tanto para las personas como para el ganado, y consumos estacionales, como son los debidos al riego de cultivos. Para determinar las necesidades humanas y de animales se multiplica en consumo diario de cada individuo por la población total. El consumo humano depende de muchos factores pero se suele aceptar que, como media, se consumen 90 litros por persona y día, aumentando a 200 litros o más según las circunstancias. En aplicaciones de riego, el consumo depende del tipo de cultivo y de factores climáticos.

Las necesidades de agua, tanto para el abastecimiento de agua potable como para el riego, se pueden determinar en una primera aproximación a partir de datos recogidos en tablas.

<b>CONSUMO PROMEDIO PARA ACTIVIDADES HUMANAS</b>			
<b>Tipo de consumo</b>	<b>Litros por día</b>	<b>Litros por minuto</b>	<b>Litros por vez</b>
Persona	284		
Baño de ducha		11,5 a 19	
Manguera de 1/2" abierta		13,0	
Manguera de 3/4" abierta		19,0	
Tirar de la cisterna			12-18
Lavabos			6-8
Regar unos 5 mm una superficie de 10 m <sup>2</sup> con césped			610

<b>CONSUMO PROMEDIO PARA ANIMALES DE GRANJA</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Litros por día</b>	<b>Tipo</b>	<b>Litros por día</b>
Caballo	45	Cabra	8
Bobino	45	Oveja	8
Vaca lechera	133	Cerdo	15
Burro	23	Cada 100 pollos	15

<b>CONSUMO PROMEDIO PARA CULTIVOS</b>			
<b>Tipo</b>	<b>m<sup>3</sup>/hectárea (1 m<sup>3</sup> = 1.000 ltrs)</b>	<b>Tipo</b>	<b>m<sup>3</sup>/hectárea</b>
Arroz	100	Cereales	45
Caña de azúcar	66	Algodón	55
Frutales 150 l por árbol/día			

## Energía solar fotovoltaica

### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

El número de litros/día requeridos por persona dado en la tabla toma en consideración todo tipo de uso, como agua para higiene personal, sanitarios, etc. Cuando una vivienda no posee un sistema de agua corriente, esta cantidad se reduce apreciablemente. Los valores dados para los animales varían cuando la temperatura ambiente es elevada.

Estos valores pueden variar substancialmente, dependiendo, como ya hemos dicho, de la temperatura ambiente y de factores culturales. Además hay que añadir un **volumen de reserva**. La existencia de una reserva compensará por los días sin sol o los días durante los cuales el sistema debe ser reparado. El volumen de reserva debe equivaler a unos 3 a 10 días de consumo.

No se puede olvidar realizar un estudio sobre la capacidad de la fuente de la que se va a bombear el agua y sus variaciones estacionales, debiéndose prevenir en cualquier caso que la bomba se pueda quedar 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 media mensual se empleará la expresión:

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

donde

$\rho$  = densidad del agua, 1.000 kg/m<sup>3</sup>.

$g$  = aceleración de la gravedad; 9,8 m/s<sup>2</sup>.

$V$  = volumen de agua que se necesita diariamente, en m<sup>3</sup> y para el valor medio del mes, en m<sup>3</sup>/día.

$h$  = altura manométrica total de elevación, en m.

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

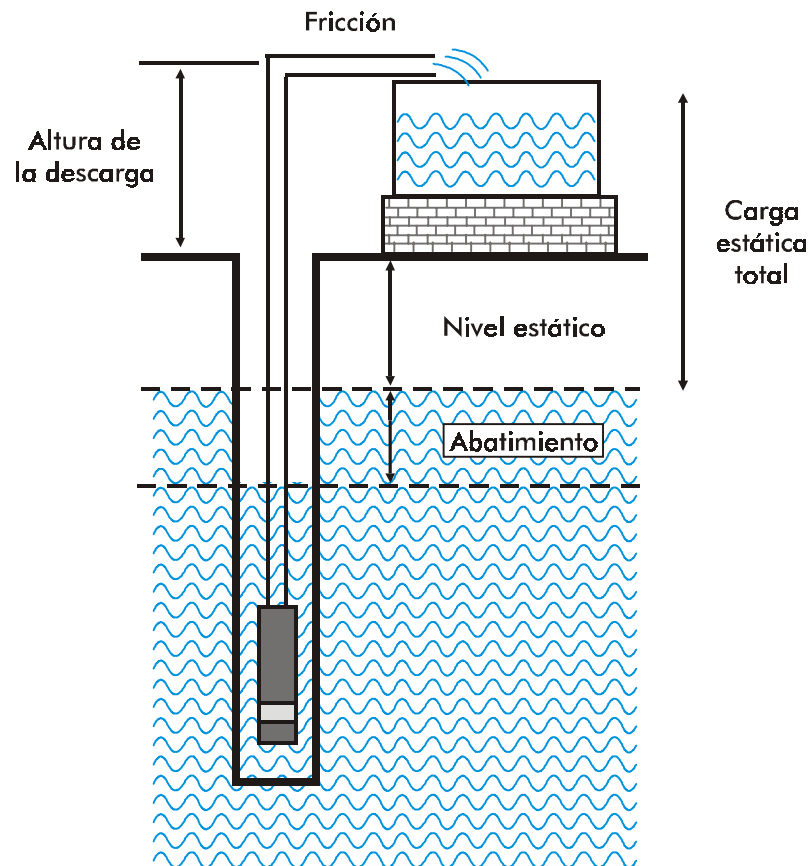
La **altura geométrica o estática** es la diferencia de cotas entre el agua en la fuente, que puede variar cuando se bombea, y el agua en la salida. Puede obtenerse con mediciones directas de la distancia vertical desde el nivel de espejo del agua antes del abatimiento del pozo hasta la altura en que se descarga el agua. La altura estática es entonces la suma del nivel estático y la altura de descarga.

### Nota

*Nivel estático*, en m: distancia vertical medida desde el nivel del suelo hasta el espejo del agua cuando no hay una bomba operando.

*Abatimiento*, en m: distancia vertical medida desde el nivel estático al nivel del agua cuando opera una bomba. Con frecuencia este valor se obtiene de pruebas realizadas durante un aforo.

*Altura de descarga*, en m: distancia vertical medida desde el nivel del suelo hasta el punto donde el agua es descargada.



Principales componentes hidráulicos de un sistema de bombeo de agua

La **altura dinámica** es el incremento en la presión causado por la resistencia al flujo de 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 PVC de similar tamaño. Además, el diámetro de los tubos influye en la fricción. Mientras más estrechos, mayor resistencia producida.

Para calcular la carga dinámica, es necesario encontrar la distancia que recorre 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: añadiendo un tanto por ciento de la distancia de recorrido a la longitud total, utilizando tablas publicadas por los fabricantes que indican el porcentaje de pérdidas por fricción que debe considerarse en base al caudal, el diámetro y el material de las tuberías, o mediante fórmulas como las siguientes:

$$h_d = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

donde

$h_d$  = altura dinámica.

$f$  = coeficiente de fricción.

$L$  = longitud de la tubería, en m.

$d$  = diámetro hidráulico, en m.

$v$  = velocidad media del fluido, en m/s.

$g$  = constante de la gravedad; 9,81 m/s<sup>2</sup>.

En el caso de que se encuentren en el circuito otro tipo de accesorios como codos, válvulas, etc., para determinar las pérdidas que éstos producen se emplea la expresión:

$$h_d = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

donde

$K$  = coeficiente que depende del tipo de accesorio y cuyos valores se encuentran tabulados.

$h_d$  en este caso se refiere a la pérdida que produce un elemento concreto, codo, válvula..., para el total de elementos habrá que sumar las pérdidas que producen todos ellos.

Como alternativa, para los accesorios se puede emplear su longitud de tubería equivalente, que se añadirá a la longitud real de tuberías para obtener la longitud total equivalente. Como el diámetro de la tubería aún no se conoce, lo normal es fijar la altura dinámica en un 10% de la altura geométrica, ya que debe ser mayor, y posteriormente elegir las tuberías y accesorios de manera que no se sobrepase este porcentaje.

## **4.2. Energía solar disponible, periodo crítico e inclinación óptima**

La energía solar disponible varía a lo largo del año y con la inclinación al sur del panel fotovoltaico. Es conveniente disponer de datos de radiación diaria media mensual para distintos meses e inclinaciones correspondientes al lugar donde va a instalarse el sistema, que permitirán, junto con los datos de energía hidráulica media mensual necesaria, determinar el *mes crítico de diseño* o de dimensionamiento, y la inclinación óptima.

Para su determinación se dividen, mes a mes y para distintas inclinaciones, la energía hidráulica diaria media mensual y la radiación diaria media mensual. Se obtiene así una tabla con 12 columnas, correspondientes a los meses, y donde las filas corresponden a inclinaciones normalmente tomadas de 5 en 5° desde 0 a 90°. Estos cocientes tienen dimensiones de área y representan la superficie colectora teórica que se necesitaría si los rendimientos fueran la unidad. En la tabla se busca el valor mínimo de los máximos para cada fila o inclinación, y se determina el mes crítico y la inclinación óptima que serán los correspondientes a dicho valor.

Haciendo el dimensionamiento para el mes crítico, que es el más desfavorable, se entiende que en el resto de los meses las necesidades quedarán satisfechas.

### 4.3. Cálculo de la potencia pico y la configuración del sistema generador

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 es necesario suministrar diariamente al sistema motor-bomba será el cociente entre la energía hidráulica requerida y el rendimiento diario medio mensual del grupo motor-bomba, que tiene un valor entre 0,3 y 0,4. Esta información viene dada en publicaciones del fabricante del sistema motor-bomba:

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

donde

$E_e$  = energía eléctrica que es necesario suministrar.

$E_h$  = energía hidráulica requerida.

$\eta_{mb}$  = rendimiento diario medio mensual de grupo motor-bomba.

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

$$A = \frac{E_e}{\eta_{FV} \cdot H_{dm}}$$

donde

$A$  = área de la superficie colectora.

$H_{dm}$  = radiación diaria media mensual.

$\eta_{FV}$  = rendimiento fotovoltaico.

El rendimiento fotovoltaico se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{FV} = F_m (1 - \gamma \cdot (T - 25)) \cdot \eta_g$$

donde

$F_m$  = factor de acoplo medio, definido como el cociente entre la energía eléctrica generada en las condiciones del punto de funcionamiento y la energía eléctrica que se podría generar si el sistema trabajase en el punto de máxima potencia.

$\gamma$  = coeficiente de variación de potencia de las células con la temperatura de las células.

$T$  = temperatura media diaria de las células durante las horas de sol.

$\eta_g$  = rendimiento del generador a la temperatura de 25 °C y 1.000 W/m<sup>2</sup> de irradiancia.

Para un sistema bien dimensionado se puede considerar, desde el punto de vista del acoplamiento entre el generador y el grupo motor-bomba, que las mayores temperaturas del panel que afecten negativamente al rendimiento, se alcanzan en los momentos de mayor irradiación en los que el sistema deberá operar con valores de acoplamiento elevados, esto es, en un punto próximo al de máxima potencia.

Sustituyendo los valores de  $E_e$  y  $\eta_{FV}$  en la fórmula correspondiente, obtenemos que el **área de superficie de panel** necesaria, será:

$$A = \frac{E_h}{\eta_{mb} \cdot F_m \cdot (1 - \gamma (T - 25)) \cdot \eta_g \cdot H_{dm}}$$

La potencia pico  $P_p$  es la potencia proporcionada por el módulo en condiciones estándar de 25 °C y 1.000 W/m<sup>2</sup>, en las que el rendimiento es  $\eta_g$  y que, por tanto, será:

$$P_p = \eta_g \cdot A \cdot 1.000 = \frac{E_h \cdot 1.000}{\eta_{mb} \cdot F_m \cdot (1 - \gamma (T - 25)) \cdot H_{dm}}$$

La elección del modelo de módulo con más o menos células en 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 en el punto de máxima potencia durante las horas de mayor insolación.

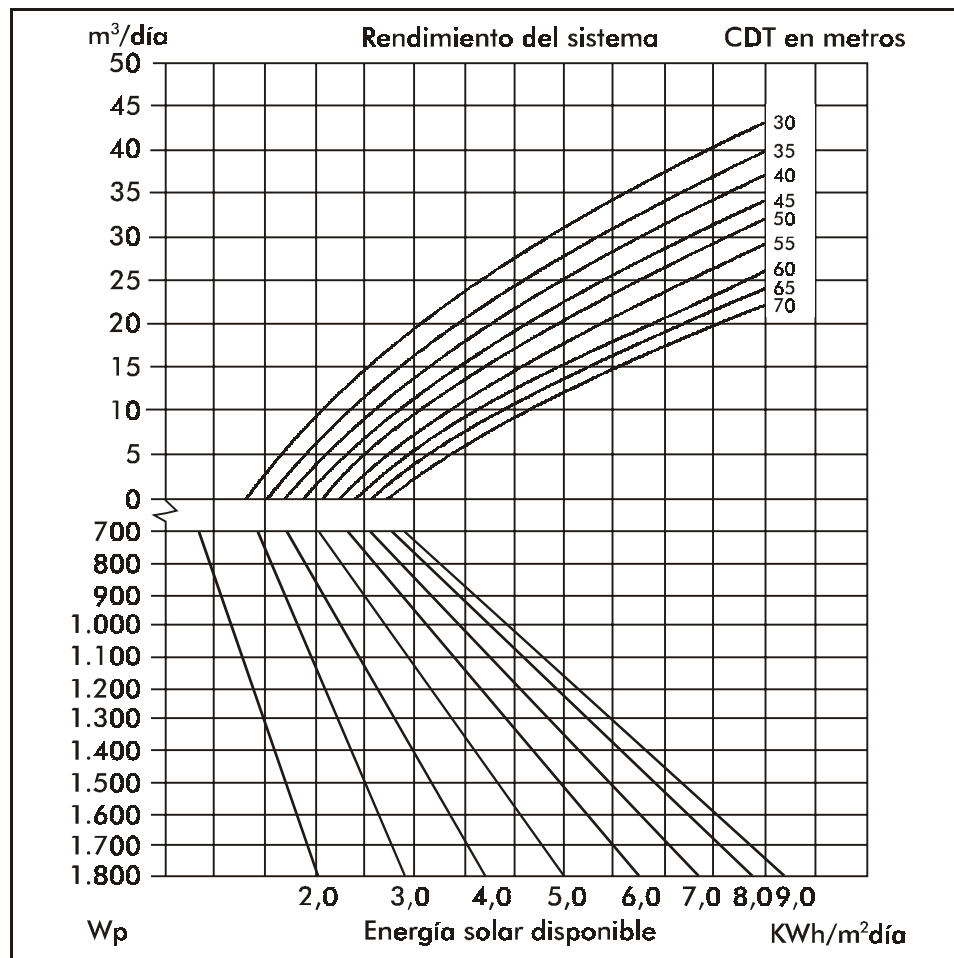
Dividiendo la potencia pico necesaria entre la potencia pico del módulo, se obtendrá el número de paneles necesarios.

## 4.4. Selección del sistema motor-bomba y dimensionado de tuberías

Cuando el valor alcanzado por el producto entre caudal diario y altura total sea mayor de 2.000 m<sup>3</sup>/día se recomienda el empleo de grupos motor-bomba diesel. Si el resultado es menor de 50 m<sup>3</sup>/día resulta más interesante el empleo de sistemas manuales. Entre estos dos valores la solución fotovoltaica resulta la más interesante.

La elección de la bomba se hará utilizando sus curvas características, h-Q, y teniendo en cuenta que el punto definido por la altura manométrica total del sistema y del caudal demandado debe ser próximo al punto de diseño de la bomba en el cual se consiguen los rendimientos más elevados.

Los fabricantes publican, para cada bomba, unas gráficas de rendimiento que relacionan el volumen de agua diario, la carga dinámica total, la radiación solar disponible y el tamaño del generador FV. Estas gráficas, conocidas como *curvas de rendimiento*, son de utilidad para comprobar el dimensionamiento realizado con los cálculos.



Curva ejemplo

Estas curvas se usan de la siguiente forma:

- Una vez realizados los cálculos que nos dan el caudal deseado, la carga dinámica total y la energía solar disponible, se selecciona entre las bombas una capaz de proveer la mayor cantidad de agua para la carga dinámica total.
- Utilizando la gráfica de rendimiento de la bomba, se localiza el caudal en el margen de la gráfica.
- Desde este punto, se traza una línea hacia la derecha hasta que cruce con la línea de la carga dinámica total que se ha calculado.

## Energía solar fotovoltaica

### Aplicación de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

---

- Desde esta intersección se traza una vertical hasta la que se cruce con la línea correspondiente a la energía solar disponible en la localización.
- Por este punto se traza una horizontal hasta el eje que marca la potencia pico necesaria en el sistema generador.

Otro tipo de gráfica es la que se realiza para unos rangos de insolación determinados. En este caso, la intersección entre el caudal y la altura, quedará dentro del rango de aptitud de una bomba, que será la más adecuada para esas circunstancias de trabajo.

El caudal máximo o caudal pico bombeado se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$Q_p = \frac{P_{hp}}{g \cdot h} = \frac{P_p \cdot \eta_p}{g \cdot h}$$

donde

$P_{hp}$  = potencia hidráulica pico.

$g$  = aceleración de la gravedad.

$h$  = altura manométrica.

$P_p$  = potencia pico del generador fotovoltaico.

$\eta_p$  = rendimiento pico del grupo motor-bomba.

Una vez que se conoce el máximo caudal que se puede bombear. El diámetro de las tuberías se puede determinar mediante la utilización de gráficos o tablas, a partir de este caudal, de la longitud total del sistema, que incluye la longitud equivalente de los distintos accesorios de la instalación, y de las pérdidas de carga, que no deben superar el 10%.

El cableado de la bomba debe de ser de adecuado para bombas sumergibles, cumpliendo lo que al respecto se indica en el REBT. Las conexiones también deben ser resistentes al agua, de acuerdo a la función que desarrolla el sistema. Deben realizarse correctamente, utilizando los productos adecuados para evitar peligros.

Las tuberías deben ser de acero inoxidable o de PVC para que resistan sin problemas de corrosión durante la vida útil de la instalación, estimada en más de 20 años.