

## Acoplamiento Directo entre Generadores Fotovoltaicos y Bombas de Agua

Vera, Luis H.<sup>1,2</sup> - Steigleder, Marco A.<sup>2</sup> - Aeberhard, María R.<sup>1</sup> - Benítez, Francisco<sup>1</sup>

*1. Universidad Nacional de Nordeste, Facultad de Ingeniería, Av. Las Heras n° 727, Resistencia, Chaco,*

*Web: <http://ing.unne.edu.ar>, Tel. /Fax: +54-(0)3722-420076, e-mail: [lh\\_vera@yahoo.com.ar](mailto:lh_vera@yahoo.com.ar),*

*2. Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS),*

*Sarmento Leite n° 425, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, Telefone: 0055-51-3316-6841*

**Resumen:** En este trabajo se presenta un estudio sobre el acoplamiento directo entre sistemas de bombeo y generadores fotovoltaicos. Los resultados obtenidos provienen del análisis para bombas de baja potencia (100W), centrífugas y volumétricas, conectadas a un sistema de generación formado por una asociación de módulos fotovoltaicos. Este trabajo permitió determinar las relaciones que llevarán a realizar los primeros algoritmos de cálculo para el desarrollo de un programa computacional para estudiar y dimensionar SBFV. En los ensayos se encontraron problemas tales como: baja eficiencia, altos umbrales de irradiancia para comenzar el bombeo de agua y sobre corrientes. Problemas que nos llevan a plantear la necesidad de una mejor elección de motores, bombas y la utilización de sistemas de ajuste de impedancias que optimicen el acoplamiento entre generador y carga.

**Palabras claves:** Energía Solar, Sistemas Fotovoltaicos, Bombeo de agua.

### Antecedentes

La utilización del agua para uso humano, animal y de irrigación se ve muchas veces comprometido debido principalmente a las dificultades de bombeo y distribución, especialmente en las localidades situadas en lugares remotos y de difícil acceso. En las regiones que no cuentan con provisión convencional de energía, la distribución de agua se hace, en muchos casos, a través del accionamiento de motores diesel o manualmente.

En estos casos los conjuntos de motores y bombas accionadas a través de sistemas fotovoltaicos ofrecen una serie de ventajas sobre aquellos sistemas basados en la utilización del petróleo, entre las cuales se destaca el costo, que es menor en estos sistemas que en aquellos donde la compra y traslado del combustible hasta el lugar de utilización y los gastos de mantenimiento los hacen menos rentables, a la vez que resultan con menor vida útil (Fredizzi, 2003). El uso de la tecnología fotovoltaica para bombeo de agua no precisa de almacenamiento de energía en baterías para su uso posterior, ya que el agua bombeada puede ser usada durante el día o, guardarse en depósitos elevados para su futuro empleo.

Para que un sistema de bombeo funcione con éxito es importante conocer en profundidad el comportamiento de todos los componentes acoplados al generador fotovoltaico y el valor de la radiación solar incidente en el lugar de instalación (Sandia, 2002).

En el Laboratorio de Energía Solar de la UFRGS, localizado a 30° de latitud sur y 51° de longitud, se proyectó y construyó una instalación para ensayo y evaluación de SBFV. Se ensayaron y midieron las variables físicas más importantes para las bombas comunes, motores y otros elementos instalados en estaciones de BFV. Debido a que no suelen encontrarse en el mercado sistemas de bombeo superficial de baja potencia, se decidió acoplar los generadores fotovoltaicos a un sistema comercial, diseñado para trabajar con dispositivos fotovoltaicos y un conjunto motor – bomba no especificados para este tipo de accionamiento. Los resultados obtenidos abarcan ensayos con potencias desde 10 hasta 200 W para bombas con motores de tensión nominal de 12 V en corriente continua.

### Instalaciones para los Ensayos

Para el estudio de los dos sistemas se proyectó y construyó un banco de pruebas que permite: evaluar, medir y comparar el comportamiento de los dos sistemas de bombeo de agua, uno formado por una bomba centrífuga y otro por una bomba de diafragma (volumétrica). En el artículo presentado por Vera (2006) fue realizada una explicación sobre los elementos constituyentes del sistema, motivo por el cual este trabajo se centrará en analizar el acoplamiento óptimo entre el generador fotovoltaico y conjunto moto-bomba, y el comportamiento integral del sistema.

### Acoplamiento entre Carga y Generador

El punto de operación para el bombeo depende de la radiación y la energía hidráulica solicitada; es decir que, cuando mayor sea la de radiación solar incidente sobre el generador, mayor será el caudal registrado. Si los sistemas fotovoltaicos de acoplamiento directo fueran sobre dimensionados, las corrientes y tensiones generadas podrían llegar a valores mayores a los soportados por los motores; en los momentos en que los niveles de radiación se encuentren en valores máximos, o en caso de un sistema sub dimensionado puede ocurrir que el bombeo de agua nunca empiece. Estos casos llevan a tener grandes variaciones de eficiencia del sistema alejándolos del punto óptimo de funcionamiento. Alonso (1992) indica que, para unidades de aspiración superficial, los mejores valores medios de eficiencia diaria varían entre el 25 y 30% respectivamente. El comportamiento de la carga es evaluado a través del trazado e interpretación de las curvas de corriente y tensión de los motores, curvas que sirven como herramientas para el

dimensionado adecuado de la fuente de potencia y para determinar el valor mínimo de irradiancia en que el motor inicia el funcionamiento (umbral de inicio de bombeo).

El método para la obtención de la curva I-V consiste en, tras fijar una determinada abertura de la válvula de control de caudal, hacer funcionar el sistema variando constantemente la tensión suministrada por la fuente, desde cero hasta el máximo valor posible, para la configuración del generador adoptado.

El procedimiento que permitirá analizar y escoger el sistema fotovoltaico más conveniente para la operación de bombeo consiste en superponer las curvas de intensidad de corriente y tensión de sistemas fotovoltaicos de diferentes potencias de salida, con las curva de intensidad de corriente y tensión de las cargas, es decir, de los motores (Hsiao, 1984).

En un análisis inicial, la elección más conveniente debería recaer sobre el sistema que maximice la transferencia de potencia eléctrica hacia el sistema; es decir que el generador fotovoltaico debería ser escogido de modo que sus curvas I-V se intercepten los más cerca posible del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico (Leasnier, 1991). Los puntos que caracterizan el encuentro de la curva del motor con diferentes curvas del generador se denominan puntos de trabajo. Duffie y Beckman (1991) afirma que si los puntos de trabajo operan lejos de los puntos de máxima tensión, tanto en bajos como en altos valores de irradiancia, no existirá una buena compatibilidad entre las características eléctricas de la carga y el generador, lo que tornará ineficiente la combinación adoptada. Respecto a esto, el GTEF (1995) recomienda que, para una operación eficiente, las características de la bomba deben combinar con las especificaciones de salida del sistema fotovoltaico.

#### *Análisis de los acoplamientos*

Para este análisis, primero se estudió el acoplamiento de la moto-bomba con un módulo y posteriormente el número de módulos fue aumentando hasta cuatro, todos conectados en paralelo. Esta metodología fue utilizada con el objetivo de determinar el sistema que presente la mayor eficiencia.

La corriente de inicio de caudal será alcanzada en función de la configuración de los sistemas fotovoltaicos; los mismos valores de radiación incidentes sobre diferentes sistemas, en un mismo lugar y hora, genera una potencia de salida distinto para cada sistema. Por lo tanto, el valor de entrada de la radiación para el momento de inicio del caudal depende del número de módulos fotovoltaicos de cada sistema, de su configuración eléctrica, la temperatura de los módulos y de la altura de bombeo.

Con las curvas características del sistema de generación y de la carga, se procedió a superponer la curva I-V del motor con las curvas I-V del sistema formado, primeramente, por un módulo fotovoltaico, y se verifica que el punto de corriente de arranque es mayor que el máximo valor que puede entregar el sistema de generación, o sea que el bombeo de agua nunca ocurriría. Esto permite concluir que el conjunto adoptado no es adecuado para operar en este sistema de bombeo.

Con las curvas de los sistemas, formados por 2,3 y 4 módulos, por extrapolación de la curva medida, se puede verificar que cualquiera de los tres sistemas entrega potencias suficientes para generar la corriente de arranque del motor, así como para realizar el bombeo.

Para todos los casos, existe una diferencia entre los puntos de máxima potencia de las curvas de los sistemas y los puntos de trabajo del sistema. Esta diferencia es responsable, entre otros factores, de la reducción de la eficiencia en el acoplamiento, no aprovechando parte de la potencia que esta siendo entregada por el generador para una determinada solicitud hidráulica. El sistema mas adecuado, entonces, es aquel cuya diferencia sea de menor valor, para los diferentes valores de irradiancia.

Los resultados obtenidos permiten determinar que el acoplamiento fotovoltaico más adecuado es aquel formado por cuatro módulos fotovoltaicos. Para radiaciones mayores a  $920 \text{ W/m}^2$ , un sistema de este tipo puede generar corrientes superiores a los 18 A, que sobrepasan los límites de seguridad recomendados por los fabricantes del motor, pudiendo ocasionarle daños. El sistema óptimo, entonces, estaría formado por un generador formado por tres módulos fotovoltaicos (Figura 1a), ya que la diferencia es menor, en relación al sistema formado por dos módulos fotovoltaicos.

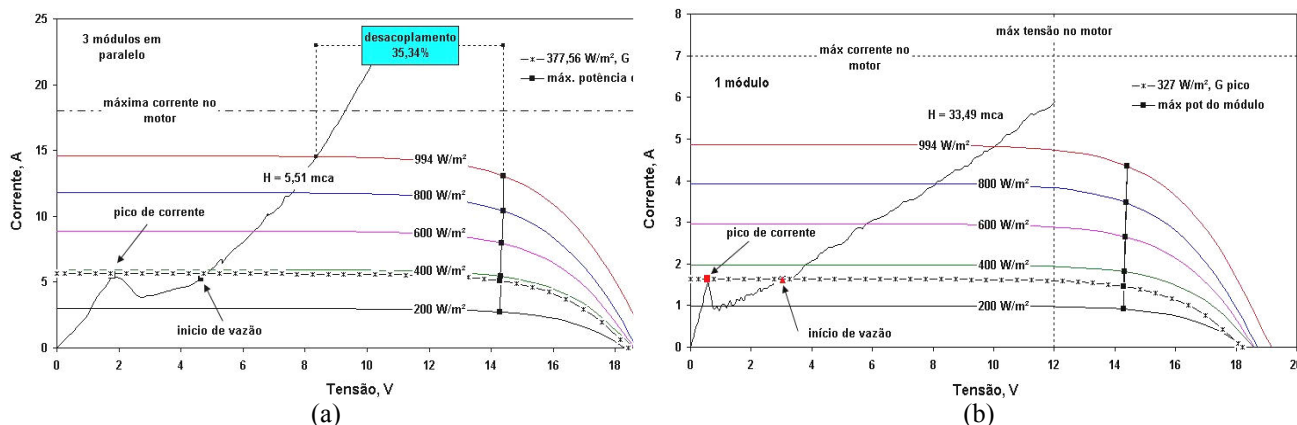


Figura 1. a) Grafico de acoplamiento eléctrico entre generador fotovoltaico y bomba centrífuga, b) Grafico de acoplamiento eléctrico entre generador fotovoltaico y bomba a diafragma.

El mismo análisis se realizó para la bomba de diafragma, verificándose que 1 o 2 módulos, entregan la potencia suficiente para generar la corriente de arranque del motor y efectuar el bombeo. El desacoplamiento del sistema de un módulo es mayor que el que posee dos módulos, pero, a la vez, la ganancia de volumen de bombeo estimado por la relación caudal – potencia es menor en un sistema de dos módulos. Por este motivo, la elección del sistema recae sobre aquel formado por un módulo fotovoltaico, tal como es representado en la figura 2b.

Analizando la figura 1 puede verse que la bomba centrífuga requiere un accionamiento eléctrico compuesto por tres módulos, mientras que la bomba de diafragma se acciona con un solo módulo.

### Comportamiento Diario del Sistema

El caudal obtenido depende la radiación, es decir que, a lo largo del día las variaciones de radiación repercuten en el caudal bombeado. A través de un análisis gráfico es posible distinguir tres áreas diferentes delimitadas por las curvas de radiación, de caudal y por los ejes cartesianos. En la primera, que se denomina región de radiación inicial y en la que no hay bombeo, representa las primeras horas de sol en el día; revela niveles de radiación en aumento, pero que no son aptos para generar potencias de salida que permitan vencer la resistencia producida por la fricción y por la altura estática de la instalación estudiada.

Con el transcurrir de las horas, la radiación aumenta hasta lograr un valor capaz de generar una potencia que accione el motor de la bomba. Este valor corresponde a un mínimo por debajo del cual no existe el bombeo y se denomina umbral útil o frontera útil de radiación. Vilela (2001) se refiere a este valor como el nivel crítico de radiación para el cual la potencia generada por los módulos fotovoltaicos permite superar las resistencias e iniciar el bombeo.

Al mediodía se da el valor máximo de radiación, que normalmente corresponde también al valor de máximo caudal. Hacia las horas de la tarde, se produce la disminución progresiva de la radiación hasta llegar a un valor mínimo, por debajo del cual cesa el bombeo. Este último valor se designa como umbral útil final o frontera útil final de radiación.

En la última área, denominada región de radiación final y que correspondería a las horas en que concluye la tarde, no se produce bombeo. Esta región se caracteriza por presentar niveles de radiación decrecientes y la corriente y tensión no son capaces de generar una potencia de salida suficientemente elevada como para vencer el conjunto de resistencias impuesto por el sistema y continuar el bombeo.

La figura 2 muestra las curvas de distribución de radiación y de caudal, en función de la hora local, para un día típico sin nubes. Pueden observarse las diferentes regiones de radiación - caudal y las líneas límites de radiación. En la figura 2b es posible reconocer la variación de volumen de agua bombeada en función de la radiación recibida por los módulos fotovoltaicos.

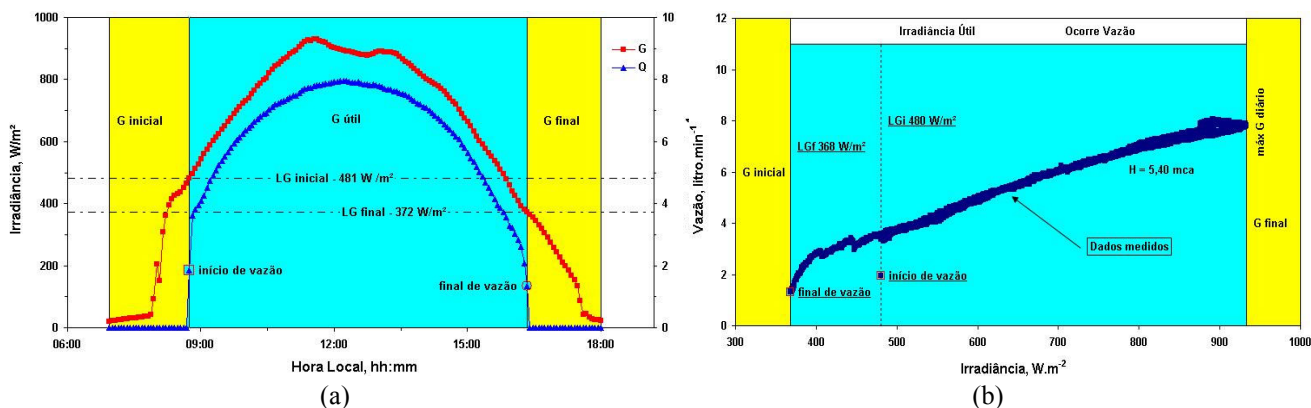


Figura 2. a) Volumen de agua bombeado por la bomba centrífuga a lo largo del día b). Variación de caudal en función de la radiación recibida por el generador.

### Eficiencia del Sistema

La eficiencia diaria en la conversión fotovoltaica combinada con la eficiencia del sistema hidráulico permite obtener la eficiencia total del sistema. En la Tabla 1 se presentan, para dos alturas manométricas, los valores de eficiencia diaria de la conversión fotovoltaica para una determinada cantidad de energía solar recibida en el plano de los módulos fotovoltaicos, el caudal bombeado, la eficiencia hidráulica y la eficiencia total del sistema para las dos bombas en estudio.

Agregando a estos datos los valores de eficiencia del sistema de generación y del sistema hidráulico, pueden observarse los bajos valores de eficiencia que se obtienen con este tipo de sistemas. Para solucionar este problema, es preciso un detallado análisis de las cargas, que permita conseguir un mayor aprovechamiento de los dispositivos fotovoltaicos.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE**  
**Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2006**

Tabla 1. Valores diarios obtenidos para los sistemas estudiados para dos alturas manométricas diferentes.

	bomba centrífuga		bomba diafragma	
	3,80 mca	5,40 mca	16,32 mca	20,59 mca
$\eta$ diaria hidráulica, %	19,88	7,55	41,19	45,54
Volumen bombeado	8,60	2,70	1,70	1,35
$\eta$ diaria da conversión, %	4,20	4,69	5,77	4,83
Energía solar diaria, kJ	20500	21100	17700	19200
$\eta$ del sistema. %	1,26	0,43	3,36	3,02

### Conclusiones

Los ensayos realizados a través de un banco de pruebas para bombas, centrífugas y volumétricas, accionadas con motores de corriente continua de 12 V y baja potencia permitieron determinar la relación entre las características eléctricas del generador (panel fotovoltaico) y las características eléctricas de los motores, y esta relación es denominamos acoplamiento. Se concluyó que el acoplamiento depende de la altura manométrica del sistema, del tipo de bomba y de las características eléctricas del motor que acciona la bomba, parámetros que determinan el punto de trabajo del sistema.

Se encontraron tres zonas características de bombeo que permiten analizar: el umbral de radiación para el cual se inicia el bombeo de agua; la zona útil (caudal bombeado), y la zona de corte de bombeo. Se determinó también el volumen de agua diario bombeado para una determinada energía recibida y la eficiencia del sistema.

Se determino que la eficiencia del sistema con la bomba de diafragma tuvo una eficiencia mayor e que la misma es casi independiente de la altura, esto no ocurrió para la bomba centrífuga. Indicando que una equivocada elección del motor utilizado con la bomba centrífuga lleva a que una gran parte de la energía generada por el sistema fotovoltaico no sea aprovechada; por lo cual es importante considerar esto antes de realizar la instalación, o bien, introducir un seguidor de punto de máxima potencia o una impedancia de acoplamiento entre el generador y la carga.

Con los ensayos realizados se construyeron las curvas características de cada elemento ensayado en el sistema; lo que permitiría plantear los modelos matemáticos que serán introducidos en programa computacional que está siendo desarrollado.

### Referencias

Alonso, M., Chenlo, F., 1992. "Diseño y Dimensionado de Sistemas de Bombeo Fotovoltaico", Laboratorio del Instituto de Energía Renovables, Editorial CIEMAT, Madrid, España.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. "Solar Engineering of Thermal Process", John Wiley & Sons, New York, USA.

Fedrizzi, M. C., 1997. "Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamentos Fotovoltaicos", Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil.

Hsiao, R and Blevins, B. (1984) Direct coupling of photovoltaic power source to water pumping system. Solar Energy 32,4,pp489-498

Sandia National Laboratories, 2001. "Guía para el desarrollo de proyectos de Bombeo de Agua com Energia Fotovoltaica", Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University, New México, USA.

Vera, L. H., Staigleder, M. A., Aeberhard, M. R., Benitez, F., 2006. Bancada de Ensayo para Determinar el Desempeño de SBFV de Baja Potencia. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Secretaria General de Ciencia y Técnica, UNNE.

Vilela, O. C., 2001. "Caracterização, Simulação e Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Abastecimento de Água", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN – DEN / UFPE, Recife - PE, Brasil.