



SISTEMA DE BOMBEO TERMICO DE AGUA UTILIZANDO UN CONCENTRADOR SOLAR

N. Diaz¹, Víctor Aramburu¹, A. Iriarte^{2,4} y L. Saravia^{3,4}
Facultad de Cs. Exactas y Naturales Universidad Nacional de Catamarca,
Avda. Belgrano 300 C.P. 4700, endiadz@c.exactas.unca.edu.ar

RESUMEN: Se presenta el diseño de un sistema de bombeo directo, no fotovoltaico, utilizando la energía captada de la radiación solar en un concentrador tipo parabólico, para generar, mediante una caldera situada en el foco, la presión del vapor que se utiliza en una bomba. La misma fue construida con dimensiones estimadas de acuerdo a la potencia disponible en el sistema concentrador-caldera, lo cual se midió previamente. Las pruebas de bombeo se realizaron a distintas alturas, midiendo en cada una de ellas el tiempo y la cantidad de agua bombeada, así como la radiación solar disponible. Podemos destacar que la presión alcanzada en la caldera se corresponde con la altura de la columna de agua durante el bombeo, de manera que podemos concluir que el sistema presenta una pérdida de carga muy pequeña, y una buena performance para las multifunciones del concentrador.

Palabras clave: energía solar, bombeo de agua, concentrador solar.

INTRODUCCIÓN

En la antigüedad se construyeron numerosos sistemas de bombeo, los que funcionaban con el vapor generado en una caldera cuya fuente de energía era la combustión de materiales fósiles. Estos fueron reemplazados, con el transcurrir de los años, por sistemas eléctricos, los que no generan las conocidas emisiones dañinas para el ambiente.

Si bien hoy disponemos de la energía eléctrica en los centros urbanos, existen zonas tan alejadas de estos que se hace inviable llegar con la misma por el enorme costo de inversión, sin retorno, que ello implica. Es precisamente en estas zonas donde la necesidad de bombeo de agua se presenta de manera crítica, como por ejemplo en la región de la Puna, donde se carece de núcleos húmedos con los servicios mínimos de agua corriente. El tener estos servicios, como ya sabemos, no solo facilita las tareas culinarias y de higiene, sino que, y tal vez lo más importante, brinda la posibilidad de integrar a la cocina y el baño con los otros ambientes de la vivienda, lo que produce un beneficio intrínseco, no mensurable en términos económicos.

Si bien existen numerosos sistemas comerciales de bombeo solar fotovoltaico, se trata de sistemas importados, que además de elevar el costo de la instalación, requieren personal especializado para su mantenimiento.

El sistema propuesto se considera adecuado como solución en estos casos, ya que no utiliza celdas fotovoltaicas y las tareas de mantenimiento son pocas y sencillas. Se debe considerar además como una ventaja el hecho de los niveles de altura donde se requiere el bombeo de agua, es mínimo por las características de las construcciones.

Es digno mencionar que este sistema forma parte de una batería de dispositivos para el uso alternativo y complementario de los concentradores solares, que permiten mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región mencionada. Es decir, se pretende que el mismo generador que es utilizado para, por ejemplo cocinar, sea utilizado, en las horas que no se realiza dicha actividad, para bombear agua.

En el presente trabajo se describen el concentrador solar parabólico de foco profundo y los prototipos desarrollados para los ensayos preliminares y determinación de parámetros de bombeo para diseño, y el prototipo de bomba definitivo. Se analizan los resultados de la eficiencia del concentrador en función del tiempo y los ensayos preliminares para diseño y los con el sistemas de bombeo construido, determinándose caudal promedio, tiempo de bombeo y relación entre altura de bombeo y tiempo.

MATERIALES Y MÉTODO

El sistema diseñado consta esencialmente de dos partes: un generador térmico solar y una bomba de vapor del tipo cilindro-pistón. El generador térmico provee el vapor que ingresa a la bomba para la acción mecánica del pistón, como se muestra en el esquema de la Fig.1.

Parcialmente financiado: UNCa, PDL, PFIP

¹ Becarios UNCa

² INENCO, FCA- UNCa

³ INENCO, UNSa

⁴ Investigador del CONICET

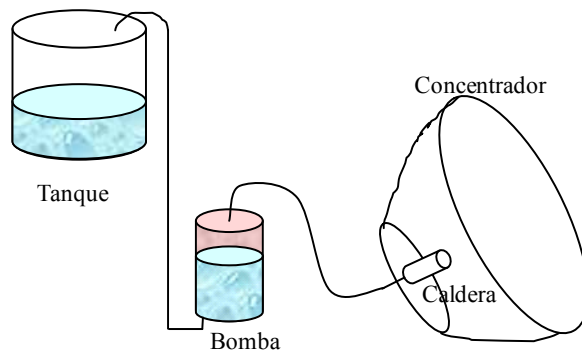


Fig.1. Esquema general de funcionamiento del sistema de bombeo

Descripción del generador térmico solar

El concentrador de tipo parabólico está montado sobre una estructura de caño rectangular. En el foco del concentrador se coloca una caldera de volumen cilíndrico de 13 cm de diámetro y 30 cm de longitud, y con una cubierta de vidrio pyrex. La construcción del espejo es muy sencilla. Se arman brazos radiales con la curvatura necesaria, los que se sueldan a una circunferencia interior de 0,50 m de diámetro y a otra circunferencia externa con el diámetro del espejo. Esta estructura es muy sólida y sobre ella se colocan los troncos de cono, contruidos con placas de aluminio de alta reflexión, de 0,4 mm de espesor. El soporte de este espejo es de tipo horizontal, con un eje de rotación vertical y otro horizontal con los cuales se orienta el espejo para seguir al sol. La rotación vertical se logra girando toda la estructura mediante las ruedas del equipo. El eje horizontal esta dividido en dos partes soldadas a cada lado del espejo. El mismo, atraviesa en forma virtual el absorbedor de manera que el absorbedor no se traslada espacialmente cuando se orienta el espejo y el balance del espejo se simplifica ya que el mayor peso, el del absorbedor, está sobre el eje de rotación, Fig. 2. Esto minimiza el uso de contrapesos. (Saravia *et al.* 2004).



Fig.2. Vista de frente del concentrador parabólico con la caldera en el foco

Descripción de la bomba de vapor

Prototipo de diseño: se construyó primero una bomba prototipo de prueba para diseño y determinación de parámetros característicos de bombeo con motor de vapor, constituida por dos cilindros concéntricos. El interior de 20 cm de diámetro y 33 cm de altura, tiene una tapa de acero desmontable. El exterior, de aproximadamente 30 cm de diámetro y 40 cm de altura, actúa como recubrimiento del aislamiento de lana de vidrio que cubre exteriormente el cilindro menor. En el cilindro interior se coloca el agua a bombear, y sobre su superficie libre, un pistón de material térmicamente aislante. Este divide a la camisa interior en dos cámaras, la inferior que contiene el agua y la superior, que alberga el vapor proveniente de la caldera, y de ese modo evita la transferencia del calor desde el vapor a la masa de agua a bombear.

La capacidad de este prototipo es de aproximadamente 10,3 litros, pero la cantidad disponible para el bombeo es algo menor (8,5 litros aprox.) ya que la entrada de agua de alimentación y la salida para bombeo se encuentran en los laterales a algunos cm de la base, lo cual deja un remanente en el cilindro. El flujo de vapor proveniente de la caldera ingresa a la bomba por un tubo colocado en el centro de la tapa superior. Una vista de la bomba se ofrece en la Figura 3a.

Prototipo de bombeo: la bomba para las pruebas finales (Fig. 3b) fue construida en chapa, con iguales características que el prototipo de diseño, salvo que las entradas y salidas de agua están por la base (tapa inferior); el cilindro tiene aislamiento

térmico interior; de un tamaño mayor y con las relaciones ideales a fin de minimizar las pérdidas. Esto se logró minimizando la superficie exterior del cilindro de la bomba. Se trabajó con la función:

$$s = 2 * \pi * r^2 + 2 * \pi * r * h \quad [1]$$

Siendo s la superficie a minimizar; r el radio del cilindro y h su altura. A fin de encontrar las dimensiones adecuadas expresamos la superficie en función del volumen (conocido) para tener una sola variable:

$$s = 2 * \pi * r^2 + \frac{2 * V}{r} \quad [2]$$

Derivando la expresión e igualando a cero se resuelve para r y luego se calcula la altura h :

$$r = \frac{(2 * V)^{\frac{1}{3}}}{(4 * \pi)^{\frac{1}{3}}} \quad [3]$$

$$h = \frac{V}{\pi * r^2} \quad [4]$$

Se consideró un volumen de 40 litros para la bomba, lo que significa un cilindro de 18,5 cm de radio y 37,1 cm de altura aproximadamente. Para el aislamiento térmico interior del mismo se encamisó con resina epoxi y fibra de vidrio, considerando su aceptable coeficiente k de conducción térmica de $0,043 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. El aislamiento exterior se realizó con lana de vidrio. El cilindro pistón es de material PVC resistente a altas temperaturas.



Fig. 3a. Prototipo de diseño



Fig. 3b. Prototipo de bombeo

Las mangueras utilizadas para la conexión entre la caldera y la bomba son del tipo de las usadas en los compresores (hasta 20 bares de presión). También se aislaron estas con tubos de poliuretano forrado con papel aluminio, para minimizar las pérdidas del calor del vapor por disipación al ambiente.

Los ensayos se realizaron en días despejados y con niveles aceptables de radiación solar. Se utilizó para la medida de dicha radiación un piranómetro tipo Kipp & Zonen, calibrado $\pm 2 \%$. La temperatura se midió con termopares de *cromel - alumen*. Ambos sensores conectados a un sistema de adquisición de datos automático tipo ADAM. La presión se midió con sistema analógico tipo reloj.

El concentrador se reorientó cada 5 minutos, de modo que se hizo un seguimiento casi permanente del sol. Asimismo se realizaron las lecturas correspondientes de la presión, en un manómetro adosado al sistema, y el control de los tiempos. Al término de cada ensayo se verificó el volumen de agua bombeada y el remanente en la caldera, para obtener el consumo en la misma. Para todos los ensayos se trabajó con la misma cantidad de agua inicial en la bomba.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Evaluación del Concentrador y la Caldera

Los resultados se muestran en la Fig. 4, indicándose en el eje horizontal el valor del tiempo relacionado con la semidesviación y en el eje vertical la potencia media recogida en todo el intervalo. El valor 0 en el tiempo corresponde al espejo sin desvío. Se aprecia que para 20 minutos de semidesvío la caída en la potencia media es pequeña, del orden del 10 %, lo que justifica plenamente el hecho de que el espejo se mueva cada 40 minutos.

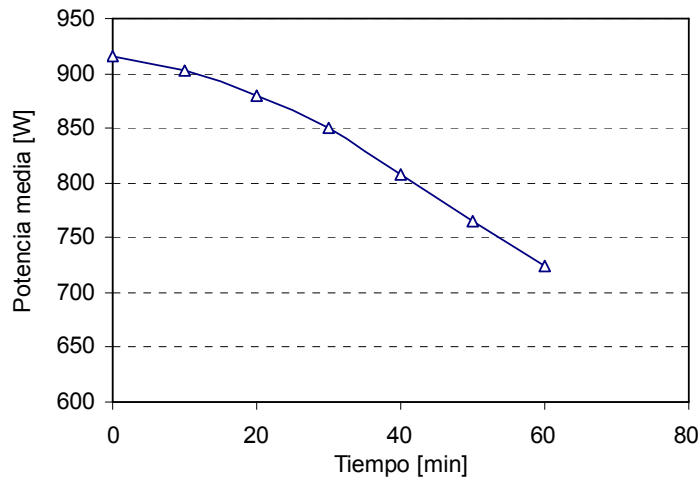


Fig.4: Comportamiento del Concentrador fijo (sin reorientación) para una hora de ensayo

Cabe recalcar que el sistema entrega una potencia en las regiones subbandinas del orden de 1.000 W por metro cuadrado normal al haz. Dado que el colector se ubica normal al haz recibe del orden de 2.000 W durante 9 horas al día, reorientándolo manualmente. El rendimiento medido del sistema es del orden de 50 % cuando se trabaja a temperaturas en el orden de los 100 -120 C, lo que implica que se dispone durante todo el día de unos 1.000 W. Cuando se trabaja a 300 C usando las barras de aluminio en el foco, la eficiencia baja a un 25 % y se puede recoger constantemente unos 500 W.

Con la caldera en el foco, con la cubierta de vidrio, una carga de 1,5 litros de agua y reorientando el concentrador, se alcanzó una presión de 8,5 bares en 24 minutos, nivel para el cual se abrió una válvula de seguridad. Estas evaluaciones del comportamiento del generador y de la caldera se realizaron con el fin de conocer la potencia disponible en el sistema para dimensionar la bomba.

Ensayos preliminares utilizando el prototipo para diseño

En el análisis del comportamiento de la presión en la caldera para los ensayos a distintas alturas se advierte que luego de alcanzar la altura de la carga fijada, la presión continúa constante en razón de que se abre una válvula de seguridad. La carga corresponde a 10, 7, 5 y 3 m de columna de agua. La presión en la caldera crece de manera lineal con el tiempo hasta un punto en que se mantiene constante un corto periodo, en el cual consideramos que hay, por una parte, una variación en la potencia entregada por el concentrador y por otra parte, una fuerte disipación en los componentes del sistema (mangueras, acoples manómetro etc.), principalmente en el cuerpo de la bomba. Luego retoma su crecimiento lineal hasta el comienzo del bombeo, a partir de lo que se mantiene constante hasta el final del mismo.

El consumo de agua en la caldera es la porción del volumen inicial de agua en la caldera que se convierte en vapor y permite el funcionamiento del sistema de bombeo. Si analizamos esta cantidad en función de la altura de bombeo, se observa que se mantiene una relación aproximadamente lineal. Como era de esperar, el consumo de agua aumenta con la altura de bombeo.

Con respecto al caudal de bombeo, es decir el flujo promedio de agua a la salida del sistema de bombeo para las diferentes alturas ensayadas, y cuya cantidad se determina como el cociente entre el volumen de agua bombeado y el tiempo durante el que se produce el mismo, presenta también un crecimiento proporcional con la altura de bombeo.

El tiempo neto de bombeo (tiempo durante el cual el caudal es distinto de cero) disminuye con la altura, mientras que el tiempo total de ensayo, es decir desde que se orienta el concentrador hasta que finaliza el bombeo, crece proporcionalmente con la altura. Esto revela la elasticidad del sistema.

El hecho de que la presión en el sistema se corresponde con la altura de bombeo (considerando el equivalente a la presión de la columna de agua) muestra que no hay pérdidas considerables de carga en el mismo, esto es, pérdidas por rozamientos mecánico del fluido, sino, y más importantes, las pérdidas disipativas de flujo calórico. La tabla 1 se muestra los valores obtenidos.

Altura bombeo [m]	Caudal promedio [l/min]	Tiempo de bombeo [min]	Tiempo total de ensayo [min]
3	0,70	11	21
5	0,91	9	23
7	0,98	8	40
10	1,07	7	46

Tabla 1. Matriz de resultados. Valores de algunas cantidades de interés obtenidas en los ensayos de evaluación con el prototipo de diseño de bombeo

Ensayos utilizando el prototipo de bombeo

Las gráficas en la figura 5 muestran el comportamiento de la presión en la caldera para los ensayos a distintas alturas de carga. En las mismas se advierte que luego de alcanzar la altura de la carga fijada, la presión continúa constante mientras bombea. La carga corresponde a 10, 7, 5 y 3 m de columna de agua.

Se observa que en el nuevo sistema la presión se mantiene a cero algunos minutos luego de iniciado el ensayo, lo cual es razonable por el mayor tamaño de la bomba.

Si bien, en general, los tiempos que tarda en alcanzar la presión necesaria para comenzar a bombear son algo mayores en el nuevo sistema, el efecto es más notable en los ensayos a menor altura; consecuencia de la mayor inercia en la bomba nueva.

Las pequeñas variaciones en el crecimiento de la presión, al comparar su evolución para distintas alturas de bombeo en el sistema, se deben a las pequeñas diferencias de radiación, para los días de ensayo. No obstante demuestran un crecimiento sostenido de la presión. No se observan mesetas de presión constante antes de comenzar el bombeo como en los ensayos con el prototipo para diseño, lo cual se debe al aislamiento interno incorporado en el diseño final.

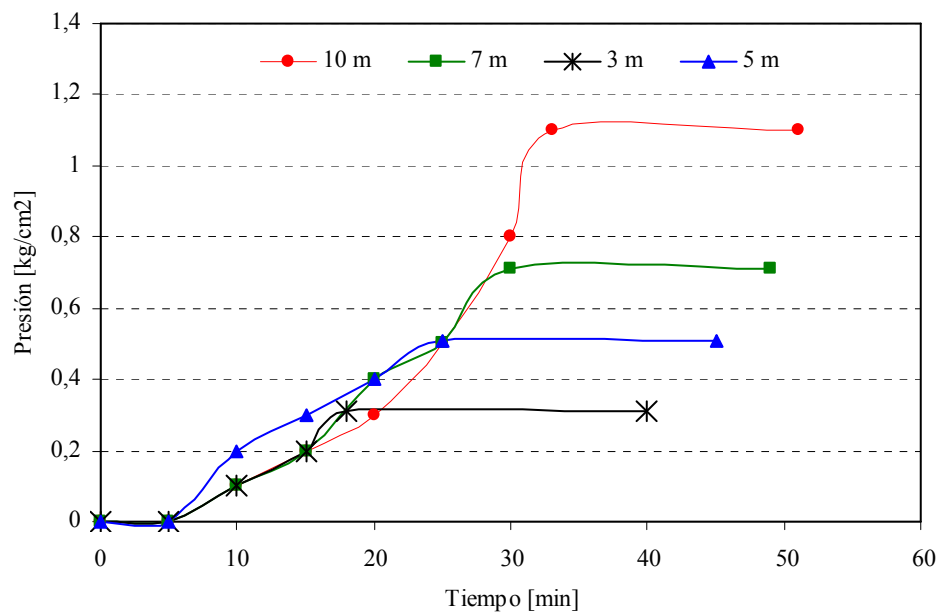


Fig. 5. Variación de la presión en la caldera en función del tiempo para distintas presiones de carga en el nuevo sistema.

Consumo de agua de la caldera

Al analizar el consumo de agua en la caldera, en función de la altura de bombeo, se observa que, si bien se mantiene una relación aproximadamente lineal en el sistema nuevo, los consumos son notablemente mayores que con la bomba prototipo de los ensayos preliminares (Fig. 6). Esto es obviamente por el mayor tamaño del dispositivo. También en este caso el consumo de agua aumenta con la altura de bombeo.

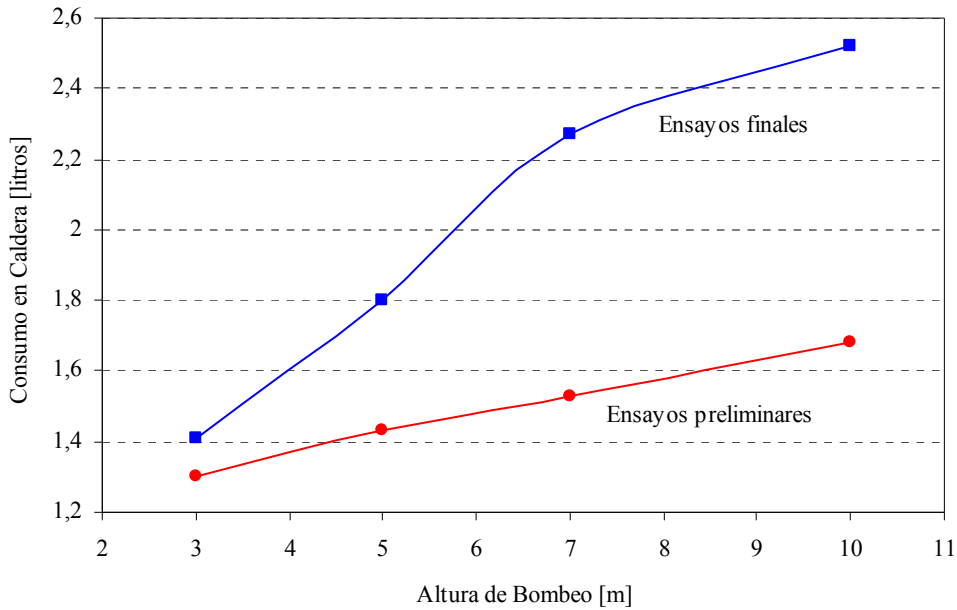


Fig.6. Variación del consumo de agua para diferentes presiones de carga

Caudal de bombeo

Al analizar el caudal de bombeo, observamos que también presenta un crecimiento casi lineal con la altura en el sistema nuevo, al igual que con el prototipo para diseño (Fig. 7), pero los caudales son notablemente mayores.

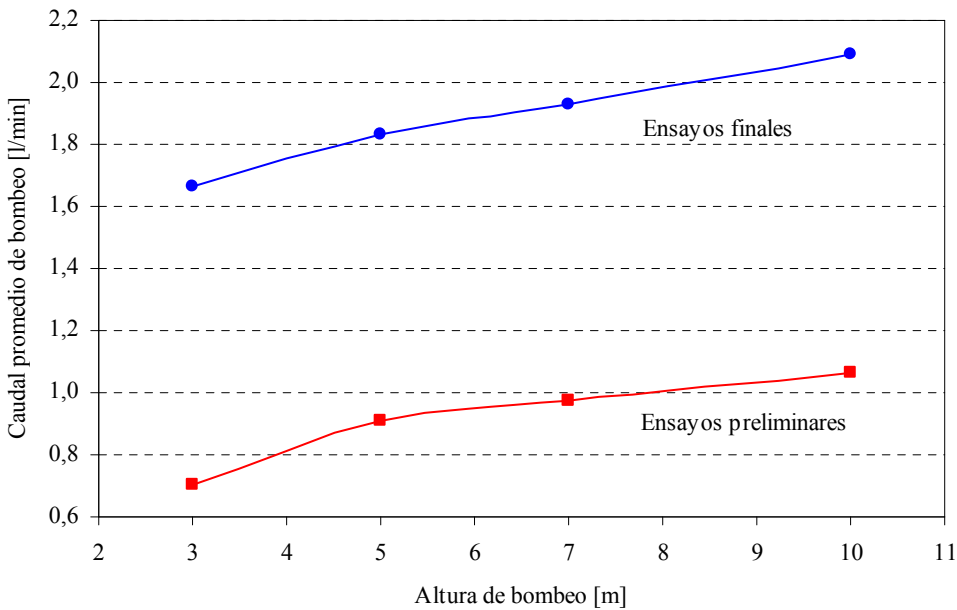


Fig. 7. Variación del caudal promedio de bombeo en función de la altura de bombeo

Relación altura de bombeo – tiempo

El tiempo neto de bombeo (tiempo durante el cual el caudal es distinto de cero), al igual que en los ensayos preliminares, disminuye con la altura, mientras que el tiempo total de ensayo, es decir desde que se orienta el concentrador hasta que finaliza el bombeo, crece proporcionalmente con la altura. En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos de las cantidades de interés analizadas.

Altura bombeo [m]	Consumo en caldera [litros]	Caudal promedio [l/min]	Tiempo de bombeo [minutos]	Tiempo total de ensayo [minutos]
3	1,41	1,66	22	40
5	1,80	1,83	20	45
7	2,27	1,93	19	49
10	2,52	2,09	18	51

Tabla 2. Matriz de resultados. Valores de algunas cantidades de interés obtenidas en las pruebas del prototipo diseñado para bombeo de agua

Los tiempos, tanto de ensayo como el neto de bombeo, son considerablemente mayores que en el caso de los ensayos preliminares.

Se destaca el hecho de que el caudal de bombeo aumenta con la altura, contrariamente a lo que ocurre, por ejemplo, con una bomba eléctrica donde el caudal tiende a disminuir cuando se bombea a mayor altura. Pero se debe tener en cuenta de que el sistema en estudio, trabaja a presión variable y cuanto mayor es la altura, hay mayor carga y por lo tanto mayor presión deberá alcanzar la caldera para hacer posible el bombeo. Esto es, a mayor altura, bombea con mayor presión, por ello es mayor el caudal. No obstante el tiempo que tarda en alcanzar la presión necesaria para comenzar a bombear es mayor cuando mayor es la altura.

Niveles de Radiación Solar

Los niveles de radiación solar, normal al plano del concentrador, medidos en los ensayos preliminares y en las pruebas finales fueron muy similares, tanto en sus valores como en el rango de variación. Dichos valores oscilaron entre los 750 y 900 w/m² aproximadamente.

Todas las mediciones fueron realizadas en días invernales, despejados y con temperaturas ambiente alrededor de los 22 °C

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, comprobamos que es posible utilizar el concentrador de foco profundo, para el bombeo directo de agua, destinado a uso doméstico productivo. Esta actividad se suma a las otras tareas (cocción, calentamiento, destilación, etc.), de manera alternativa y complementaria, constituyendo un sistema económico y casi libre de mantenimiento.

El aislamiento térmico interior del cilindro permitió mejorar el comportamiento del sistema, logrando con ello un crecimiento sostenido de la presión, hasta el comienzo del bombeo.

El caudal promedio suministrado por la bomba, se halla en el orden de los valores del caudal obtenido en una red de distribución domiciliaria.

Dado que el colector puede producir mediante una pequeña caldera, colocada como absorbedor, vapor de agua con presiones hasta 2 o 3 kg/cm², utilizando sistemas muy sencillos este vapor puede accionar una bomba no rotativa para el bombeo de cantidades de agua en el orden de los 500 litros diarios.

En posteriores ensayos, se incorporarán en el diseño válvulas sencillas que permitan un funcionamiento periódico y continuo del sistema. De este modo se podrá disponer de un equipo de bombeo, de fácil operatividad, a un costo relativamente bajo y tecnología muy sencilla.

REFERENCIAS

- Saravia L., Cadena C., Caso C. y Fernández C. (2002). "Cocinas solares comunales de uso múltiple", Energías Renovables y Medio Ambiente, 10, 51-56.
- Saravia L.R., Cadena C., And Franco J. (2004), "Multiple Use Communal Solar Cooker", Solar Energy, In Press.
- Saravia L., Cadena C., Iriarte A. "Generador térmico solar de bajo costo para usos múltiples de interés social". Proceeding XII Congreso Ibérico y VII Iberoamericano de Energía Solar de la Asociación Española y la International Solar Energy Society, Vol I, pp. 625-630. Vigo España. Septiembre 2004. ISSN CD 84-609-2264-2.

ABSTRACT

The design of a system of direct pumping appears, nonphotovoltaic, using the caught energy of the solar radiation in a concentrator parabolic type, to generate, by means of a boiler located in the center, the pressure of the steam that is used in a pump. The same one was constructed with dimensions considered according to the power available in the system

concentrator-boiler, which was moderate previously. The pumping tests were made to different heights, measuring in each one of them the time and the pumped amount of water, as well as the solar radiation available. We can emphasize that the pressure reached in the boiler corresponds with the height of the water column during the pumping, so that we can conclude that the system displays a very small pressure drop, and a good performance for the multifunctions of the concentrator.

Keywords: solar energy, water pumping, solar concentrator