

PLANTA EXPERIMENTAL DE BOMBEO DE AGUA  
POR CONVERSION FOTOVOLTAICA DE LA ENERGIA  
SOLAR DE "LAS CATAS" - PCIA. DE LA RIOJA:  
DESCRIPCION Y PRIMEROS RESULTADOS

FABR S, A°; HOFFMAN, I°; REINERS, P°; RAPALLINI, A°;  
MERCOL, C°; PRACCHIA, J°; SAÑUDO, B°; MIKEIMAN, J°;  
SANCHEZ, M°; GARROT, M°; ARGANARAZ, A°; PEIRETTI, A°

\*COMISION NACIONAL DE INVESTIGACIONES ESPACIALES  
Avda. Mitre 3100 (1663) San Miguel-Buenos Aires  
ARGENTINA

\*AEG-TELEFUNKEN - INDUSTRIESTRASSE 29 - D-2000  
Wedel (Holstein) - Alemania Federal

\*SECRETARIA DE PLANEAMIENTO - Provincia de La Rioja  
H. Yrigoyen 148 (5300) La Rioja-ARGENTINA

## RESUMEN

En este trabajo se describe la planta experimental de bombeo de agua por conversión fotovoltaica de la energía solar instalada en la localidad de "Las Catas"-Pcia de La Rioja y se dan los primeros resultados de su operación con una bomba del tipo de piston preexistente. Luego de tres meses de funcionamiento (Jun-Set /84) sin fallas, no ha sido necesario utilizar el motor diesel auxiliar. A partir de los datos experimentales recogidos y utilizando el concepto de utilizabilidad (3), se predicen las cantidades de agua media que se puede bombear con el sistema.

## 1. INTRODUCCION

En las comunidades rurales del centro y noroeste de la República Argentina se hace uso intensivo del agua subterránea para satisfacer las necesidades de personas y ganado. Las estaciones de bombeo se encuentran en general alejadas de las redes de distribución de energía eléctrica. En las zonas donde el viento es escaso o las necesidades de agua exceden las posibilidades de los molinos existentes, se utilizan grupos electrógenos o pequeños generadores diesel. Estos equipos presentan problemas de mantenimiento, reparación y provisión de combustible debido a su alta dispersión geográfica. Esta realidad, unida al abundante recurso solar actualmente disponible en esta zona, hace que los sistemas de conversión fotovoltaica de la energía solar sean la solución potencialmente ideal para proveer de energía a estas estaciones.

-Investigador del CONICET

Con el Objeto de experimentar el comportamiento de estos sistemas la CNIE (Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales) firmó un convenio de cooperación técnica con el DFVLR (Organismo Espacial de Alemania Federal) para la instalación de la planta que se describe mas adelante.

El proyecto es ejecutado por AEG-TELEFUNKEN, que provee los paneles, el control y el motor eléctrico y por la CNIE y la Secretaria de Planeamiento de la Provincia de La Rioja, que aportaron la obra civil, instalación y seguimiento del sistema. Esta obra fue parcialmente financiada por la Secretaría de Energía y la Subsecretaría de Ciencia y Tecnología.

## 2. DESCRIPCION DE LA INSTALACION

La figura 1 muestra un corte esquemático de la instalación de bombeo. De acuerdo a las necesidades, se impulsa el agua a un tanque elevado (alimentación al pueblo) de  $10m^3$  ó al tanque tipo australiano de  $20m^3$  que se encuentra conectado al bebedero para el ganado. El llenado del tanque elevado se produce al cerrarse la válvula de alimentación del tanque australiano.

Para la impulsión se utiliza una bomba del tipo de piston con un cabezal de bombeo (figura 2) que transforma el movimiento rotativo del motor eléctrico en alternativo. El cabezal y la bomba se conectan mediante varillas. Antiguamente el accionamiento se realizaba con un motor diesel DIAR de 7HP. El acoplamiento entre este



vuelve a conectarse sólo cuando las baterías se han cargado lo suficiente.

El control automático protege al banco de acumuladores de una excesiva tensión (se produce electrólisis) o de descargas profundas (acorta la vida media). La Fig. 4 muestra un diagrama de funcionamiento de la unidad de control del sistema. Esta unidad maneja a través de sus salidas A1-A4 los relés K1-K4 que se muestran en la Fig. 3 (diagrama del sistema) y a través de la protección contra descarga profunda el K5. Esta unidad toma una muestra de la tensión de batería y si su valor es menor que  $V_1$  (208 V) activa la protección abriendo K5. En estas condiciones el motor no puede utilizarse. La lámpara DS2 indica esta situación. Para que las cargas puedan volver a activarse (K5 cerrado), la tensión de baterías debe sobrepasar el valor  $V_2$  (230 V). A partir de allí, el sistema puede operarse normalmente.

La protección contra carga excesiva trabaja desactivando secuencialmente los relés K1 a K4. Si la tensión de baterías supera un valor  $V_4$  (262 V), ver Figura 4, se activa un registro de desplazamientos en el sentido hacia adelante y un generador de impulsos. Por cada pulso recibido se activa un relé. El primer impulso activa K1, se espera un tiempo y si la tensión permanece aún por encima de  $V_4$ , se activa el K2 y así sucesivamente hasta desactivar todos los relés o bien hasta que la tensión tome un valor menor que  $V_4$ . Si como consecuencia de la activación de un relé (desconexión de un string) la tensión se ubica entre  $V_3$  (240) y  $V_4$  (262 V), el generador de impulsos se apaga y el sistema permanece en ese estado. Si la tensión de baterías desciende por debajo de  $V_3$ , se invierte la dirección de marcha del registro, vuelve a habilitarse el generador de impulsos y los string son conectados secuencialmente. Si luego de la conexión de un string, la tensión se ubica entre  $V_3$  y  $V_4$  se apaga el generador de pulsos y el sistema permanece en ese estado.

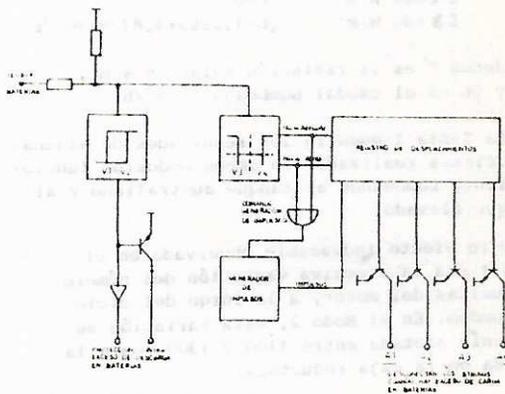


FIGURA 4 Diagrama de la unidad de control del sistema.

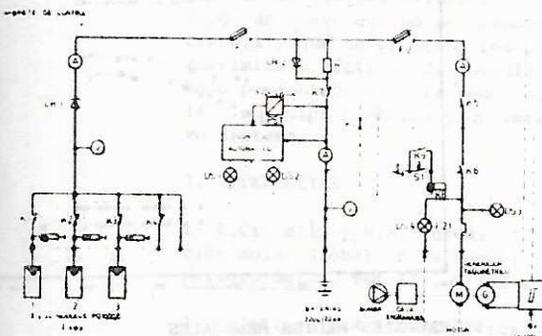


FIGURA 3 Diagrama del sistema.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA Y LOGICA DE CONTROL.

El Sistema tiene 2 modos de funcionamiento:

**Modo 1** - Las baterías se utilizan solamente para el arranque de la bomba. Transcurrido un lapso de tiempo, el banco de baterías se desconecta y el motor trabaja acoplado directamente al generador solar. Durante las horas en las que el motor no funciona, se recargan las baterías. Este es el modo de funcionamiento previsto originalmente para la instalación.

**Modo 2** - Las baterías trabajan permanentemente conectadas a la barra de alimentación. Este modo se agregó a posteriori para lograr una mayor eficiencia energética del sistema.

En el modo 1, la bomba se arranca manualmente a través de la llave basculante S1 (ver figura 3), la que fija el relé K9 y éste al K6 (se supone cerrado el K5, que es un relé de protección contra descarga profunda). Al cerrarse S1 se habilita el relé K7, desconectando las baterías del sistema. La bomba se apaga manualmente, desconectando S1, o bien al no haber radiación suficiente para mantener al motor por encima de un determinado número de vueltas, el control del motor desconecta el relé K9. Al abrirse el K9, K8 desactiva con retardo a K7, pasándose entonces a cargar baterías.

En el modo 2, la bomba arranca también manualmente, pero al estar levantada la unión entre K8 y K7, éste permanece desactivado. En estas condiciones las baterías siguen conectadas a la barra. El sistema puede apagarse manualmente o si las baterías se han descargado más allá de determinado valor (tensión de descarga profunda) el control activa el relé K5 que interrumpe la alimentación del motor. Al caer el número de vueltas a cero, K9 es desactivado y el sistema que en las condiciones iniciales, salvo K5 que

#### 4. MEDICIONES REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

El sistema fue puesto en marcha en el mes de junio/84 y transcurridos tres meses no fue necesario utilizar el motor diesel auxiliar. Hasta la fecha el sistema sólo tuvo una falla menor, que pudo ser reparada en el día. Merece notarse que en este periodo el sistema fue operado por el encargado de la planta que antes operaba el sistema diesel, manifestándose éste plenamente satisfecho con el comportamiento del mismo. Salvo durante las mediciones que se describen más adelante la planta fué operada normalmente en el modo 2.

Se realizaron mediciones del caudal de agua bombeada en función de la radiación solar incidente, con el sistema conectado en el modo 1 (baterías sólo para el arranque). El caudal fué medido con un balde aforado y un cronómetro y la radiación solar, con un solarímetro Eppley Black and White. La figura 5 muestra los resultados obtenidos. Para el sistema bombeando al tanque australiano, la radiación mínima para el funcionamiento es de  $680 \text{ W/m}^2$ . Desde los 620 hasta los  $680 \text{ W/m}^2$  el sistema arranca bien con baterías, pero cuando queda solamente conectado al generador después de un determinado número de vueltas se detiene, pues la corriente generada no es la suficiente para proveer el pa necesario durante el ciclo de subida de la bomba. Esta zona de trabajo se ha llamado "zona de inestabilidad". El ancho de esta zona podría disminuirse si se colocara un volante asociado a la polea de tracción.

A partir de los datos experimentales se han construido correlaciones que dan el caudal en función de la radiación solar incidente bombeando al tanque elevado y al australiano, estos son:

$$\begin{aligned} \text{tanque elevado} \\ E < 750 \text{ W/m}^2 & \quad Q_b = 0 \\ E \geq 750 \text{ W/m}^2 & \quad Q_b = 0.2499 + 5.4192 \times 10^{-3} E \end{aligned}$$

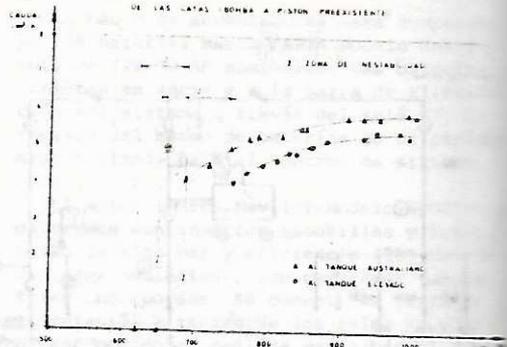
$$\begin{aligned} \text{tanque australiano} \\ E < 680 \text{ W/m}^2 & \quad Q_b = 0 \\ E \geq 680 \text{ W/m}^2 & \quad Q_b = 1.2285 + 4.8728 \times 10^{-3} E \end{aligned}$$

donde  $E$  es la radiación solar en  $\text{W/m}^2$ ,  
y  $Q_b$  es el caudal bombeado en  $\text{m}^3/\text{h}$ .

La Tabla I muestra los resultados de algunas mediciones realizadas en ambos modos de funcionamiento bombeando al tanque australiano y al tanque elevado.

Otro efecto indeseable observado en el Modo 1 era la excesiva variación del número de vueltas del motor, a lo largo del ciclo de bombeo. En el Modo 2, esta variación se mantenía acotada entre 1100 y 1300 rpm a la salida de la caja reductora.

Figura 5 - RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE BOMBEO DE LAS CANTAS BOMBA A PISTON PREEXISTENTE



#### 5. CAUDALES MEDIOS MENSUALES

Utilizando el concepto de utilizabilidad adecuadamente modificado para adaptarlo a este tipo de sistemas, a partir de los datos de radiación media supuestos para la localidad (Tabla II), se calculó el número medio de horas diarias en que la radiación se encontraba entre determinados límites, para cada mes, tomando un albedo de 0.3, y en el ángulo de inclinación visto para los paneles. La tabla III muestra el resultado de estos cálculos para  $300 \text{ W/m}^2$  en adelante. Conociendo el número de horas medias en que la radiación se encuentra en cada intervalo y con la curva experimental que da el caudal bombeado para c/valor de la radiación incidente, se estimó el caudal medio diario bombeado al tanque elevado y australiano para el Modo 2 (tablas IV y V). De estas tablas se puede ver que la eficiencia global del sistema, definida como el porcentaje útil de la energía total incidente sobre el área de celdas, se ubica entre el 0,5 y 1%. Este bajo valor se debe a que si el sistema solo puede aprovechar la energía que le llega con radiaciones mayores que la mínima de funcionamiento, desaprovecha la mayor parte de la radiación disponible.

Para el sistema funcionando en el Modo 2, se estima la eficiencia global diaria del sistema utilizando:

$$\eta_g = \eta_b \cdot \eta_{gs} \cdot \eta_{mb}$$

donde  $\eta_g$  = eficiencia global del sistema  
 $\eta_b$  = " baterías  
 $\eta_{gs}$  = " generador solar  
 $\eta_{mb}$  = " motor-bomba

Los valores de  $\eta_{gs}$  y  $\eta_{mb}$  fueron medidos y se pueden ver en la tabla I. Para  $\eta_b$  se tomó 0,85, se calculó luego la eficiencia global y con ésta los valores de los caudales totales medios diarios para el sistema funcionando en el Modo 2 (ver tablas IV y V). Estos caudales son razonables de acuerdo al consumo observado y explica porqué en el período de ensayo, no ha sido necesario poner en marcha el motor a gas-oil. Debe mencionarse que el requerimiento de la población y animales es aproximadamente  $30 \text{ m}^3/\text{diario}$ .

## 6. TAREAS FUTURAS

Se completarán a la brevedad las mediciones con el sistema existente y se instalará luego un nuevo equipo de bombeo de mayor eficiencia y que no presenta los problemas de requerimiento cíclicos de energía. En otro trabajo presentado en esta reunión, se describe la simulación numérica y optimización del nuevo sistema.

## 7. REFERENCIAS

- 1- E.Crivelli y M.A.Pedregal "Cartas de Radiación Solar Global en la República Argentina". Meteorológica, Vol.III, N°1,2 y 3 (1972).
- 2- Boletines Red Solarimétrica Nacional-Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales-República Argentina.
- 3- Klein S.A. "Calculation of Flate-Plate Collector Utilizability". Solar Energy, Vol.21 pp 393-402 (1978).

	BOMBEO AL TANQUE AUSTRALIANO		BOMBEO AL TANQUE ELEVADO	
	MODO 1	MODO 2	MODO 1	MODO 2
RADIACION SOLAR INCIDENTE ( $W/m^2$ )	1005	1005	996	1013
TENSION GENERADOR SOLAR (Volts)	253/300	235/242	230/290	230/240
CORRIENTE GENERADOR SOLAR (Amperes)	6.5/4.5	7	5.5/7	7
POTENCIA GENERADOR SOLAR (Wattios)	1350/1658	1645/1694	1595/1610	1610/1680
EFICIENCIA GENERADOR SOLAR (%)	6.6/8.1	8/8.2	7.8/7.9	7.8/8.1
CORRIENTE BATERIAS (+ Carga, -Desc)	0	5/- 3	0	4.5/- 4
PISTONADAS BOMBA (l/min)	38	33.1	35.3	32.6
CAUDAL BOMBA ( $m^3/hr$ )	5.9	5.15	5.48	5.07
CORRIENTE BOMBA (Amperes)	4.5/6.5	15/10.5	5.5/7	2/11.5
EFICIENCIA MOTOR-BOMBA (%)	22	22	28%	28%
EFICIENCIA GLOBAL SISTEMA %	1.6	—	2.2	—

TABLA I - Resultados de Mediciones Realizadas en el Sistema de "Las Catas" con Bomba de Pistón

ESTACION: LA RIOJA (CAPITAL)												
LATITUD: - 29.2°												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}$ ( $kJ/m^2$ )	23.8	22.7	17.8	14.9	11.7	10.0	10.9	13.4	16.5	20.2	23.1	24.2
$\bar{K}_T$	.56	.57	.52	.54	.54	.53	.55	.55	.54	.55	.56	.56

TABLA II - Datos de Radiación utilizados para la predicción de los caudales medios diarios en cada modo - Ref. (1), verificados con (2).

LOCALIDAD = LA RIOJA

MES	INCL	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	TOTAL
1	10	.8	1.1	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	.9	.7	.6	.4	.3	.2	11.3
2	10	.7	1.0	1.2	1.3	1.3	1.2	1.1	.9	.7	.6	.4	.3	.2	11.0
3	30	1.1	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	.9	.7	.6	.4	.3	.2	.1	10.6
4	30	.9	1.2	1.3	1.4	1.3	1.1	.9	.7	.5	.4	.3	.2	.1	10.3
5	50	.9	1.2	1.4	1.4	1.3	1.1	.9	.7	.5	.3	.2	.1	.1	10.2
6	50	1.0	1.3	1.4	1.4	1.3	1.1	.8	.6	.4	.3	.2	.1	.1	10.1
7	50	.9	1.2	1.4	1.4	1.3	1.1	.9	.7	.5	.3	.2	.1	.1	10.2
8	50	.9	1.2	1.4	1.4	1.3	1.1	.9	.7	.5	.3	.2	.1	.1	10.4
9	30	.9	1.2	1.3	1.4	1.3	1.1	.9	.7	.6	.4	.3	.2	.1	10.5
10	30	.9	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.0	.8	.6	.5	.3	.2	.2	10.7
11	10	.8	1.1	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	.9	.7	.5	.4	.3	.2	11.2
12	10	.8	1.1	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	.9	.7	.6	.4	.3	.2	11.4

TABLA III - Número Medio de horas diarias de Radiación Solar en cada intervalo para la Localidad de La Rioja estimados utilizando los parámetros meteorológicos de la Tabla II

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
CAUDAL MEDIO DIARIO ESTIMADO (m <sup>3</sup> /d) - MODO 1	18.0	17.7	13.2	12.4	11.0	9.8	10.8	12.0	13.0	14.5	17.5	18.1
CAUDAL MEDIO DIARIO ESTIMADO (m <sup>3</sup> /d) - MODO 2	31	30	25	24	23	22	23	24	25	27	30	31
EFICIENCIA GLOBAL ESTIMADA (%) - MODO 1	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8
EFICIENCIA GLOBAL ESTIMADA (%) - MODO 2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

TABLA IV - CAUDALES MEDIOS DIARIOS Y EFICIENCIAS DEL SISTEMA DE "LAS CATAS" BOMBEANDO AL TANQUE AUSTRALIANO - Ver Texto -

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
CAUDAL MEDIO DIARIO ESTIMADO (m <sup>3</sup> /d) - MODO 1	16.5	16.2	12.0	11.3	10.1	8.9	9.8	11.0	11.8	13.3	16.0	16.6
CAUDAL MEDIO DIARIO ESTIMADO (m <sup>3</sup> /d) - MODO 2	31	30	25	24	23	21	23	24	25	27	30	31
EFICIENCIA GLOBAL ESTIMADA (%) - MODO 1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
EFICIENCIA GLOBAL ESTIMADA (%) - MODO 2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9

TABLA V - CAUDALES MEDIOS DIARIOS Y EFICIENCIAS DEL SISTEMA BOMBEANDO AL TANQUE ELEVADO - Ver Texto -