

# ALTERNATIVA PARA LA EXTRACCION DE AGUA MEDIANTE ENERGIA SOLAR APLICADA A UNA POBLACION RURAL DISPERSA

RODRIGO, Víctor - DIGENNARO, Jorge - RIBOTTA, Sergio - MONASTEROLO, Ricardo  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN LUIS  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico-Sociales  
Tel.: +54 - 2657 430980/434545 – Fax: +54 - 2657 433790 e-mail: rodrigo@fices.unsl.edu.ar  
Ruta 148 Extremo Norte - (5730) V. Mercedes - SAN LUIS – ARGENTINA

## RESUMEN

Las compañías que deben suministrar energía eléctrica a nuevos consumidores, específicamente a aquellos ubicados en zonas rurales, enfrentan una situación bastante problemática debido básicamente a una limitada capacidad de distribución de la red eléctrica existente. Esta problemática se acentúa mucho más en las zonas rurales o en aquellas zonas comprendidas dentro del programa de abastecimiento eléctrico de la población rural dispersa, en las cuales la demanda o la densidad poblacional es muy reducida. Es por ello que se trata de hallar una alternativa para el suministro de energía eléctrica que sea posible desde el punto de vista económico y técnico, surgiendo entre una de ellas, la provisión de energía a través de la energía solar. La finalidad de este trabajo es presentar en conjunto una alternativa para el suministro de agua potable específicamente aplicada a una zona aislada, basada principalmente en la utilización de energías renovables, como por ejemplo la energía solar y la utilización un novedoso sistema de extracción de agua subterránea mediante la aplicación de una bomba neumática.

## Introducción

De manera paralela y conjunta nuestro proyecto de investigación realiza el estudio sobre:

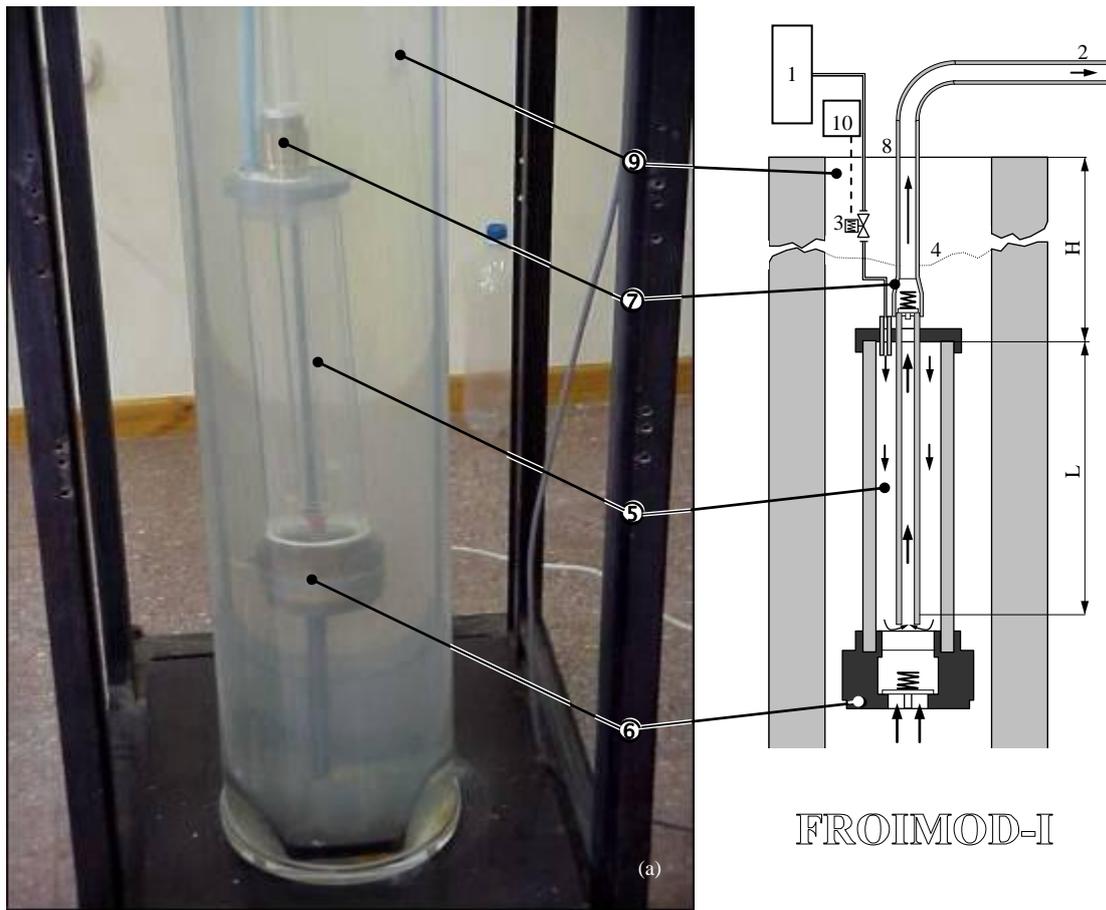
1. **El sistema de bombeo neumático**, el cual a sido desarrollado íntegramente en esta Universidad, desde la etapa de investigación, diseño, prueba, y ejecución completa del sistema. Se llevan a cabo continuos desarrollos y modificaciones que permiten ir mejorando notablemente la eficiencia y el alcance de este sistema de extracción de agua a profundidad. Partimos de un prototipo simple cuyos tiempos de carga y descarga eran comandados a través de contactos sumergidos, le siguió el FROIMOD-I (figura 1) sin contactos con tiempos de carga y descarga a través de un PLC, luego el FROMIDOD-II (figura 2) para perforaciones las cuales superan los 30 metros y después el FROMOIMOD-III (figura 3) para mayores caudales y lograr una continuidad en el abastecimiento del agua.
2. **El recurso solar disponible en la zona**, se determinaron las correlaciones matemáticas a través de datos estadísticos que nos permiten conocer la irradiación solar global y difusa en valores horarios y medios mensuales sobre una superficie. Estos valores actualmente se están comparando con los valores obtenidos por medición directa, satelitalmente y diversas gráficas de irradiación existentes.
3. **El sistema fotovoltaico necesario** (figura 4), se determinó en función de las necesidades de consumo previstas (punto 1) y de los recursos energéticos (punto 2), estimando sus costos y posteriormente se realizó la comparación con distintas variantes o alternativas indicando las ventajas y desventajas técnico-económicas para cada caso.

## 1. BOMBA NEUMATICA

### 1.1. Descripción y funcionamiento

Se trata de un dispositivo para extraer agua de cierta profundidad, por medio de aire comprimido. En la fig.1 la fuente de aire comprimido esta comunicada por la tubería de aire, con una cámara sumergida en el agua, por debajo del nivel de la misma en la perforación.. De

la cámara, sale la cañería de agua, que se eleva hasta el nivel del terreno y esta comunicada con la atmósfera.



- |                              |                             |  |
|------------------------------|-----------------------------|--|
| 1. Fuente de aire comprimido | 4. Nivel de agua            | 7. Válvula de retención TR2                    |
| 2. Salida de agua            | 5. Cámara                   | 8. Nivel del suelo                             |
| 3. Electroválvula AB         | 6. Válvula de retención TR1 | 9. Perforación                                 |
|                              |                             | 10. Control automático de la electroválvula AB |

**Figura 1**

*Foto (a) y croquis esquemático(b) de la bomba neumática simple indicando las partes principales y los componentes de la misma.*

Suponiendo que se pone la bomba en funcionamiento por primera vez, la cámara y la cañería están llenas de agua hasta el nivel estático como muestra la fig.1, el agua ha ingresado a la cámara y a la cañería, por las válvulas de retención TR1 y TR2 porque estaba abierta la electroválvula de dos vías que comunica con la atmósfera y cerrada la parte que comunica con el compresor-pulmón de aire comprimido.

En cierto instante, se invierte el sentido de la electroválvula con lo cual, la presión del aire comprimido, que actúa sobre el agua de la cámara la obliga a ingresar a la cañería a través de TR2, a la vez que obliga a cerrarse, a la válvula TR1. El agua, entonces, sube por la cañería, mientras baja en la cámara, hasta el nivel inferior, por encima de TR2; en ese instante, necesitamos distinguir, entre tres casos posibles; para eso, llamamos:

$V_c$  : Volumen caudal.- volumen entre el nivel del pozo y el nivel inferior (altura  $L$ ), en la cámara, descontando el volumen de la longitud  $L$  de tubería de agua. Es el volumen barrido por la superficie libre del agua de la cámara. Es el volumen que determina el caudal.

$V_d$  : volumen de la cañería de agua, entre el nivel del pozo y el nivel de tierra (altura  $H$ ).

Los tres casos posibles son: 1)  $V_c \gg V_d$ , en la primera etapa de compresión, la cañería se llena de agua, (cebado) y entrega agua. 2)  $V_c = V_d$ , en la primera etapa de compresión, la cañería se ceba, pero no entrega agua. A este valor del volumen  $V_c$  lo llamamos volumen caudal limite,  $V_{c\lim}$ . 3)  $V_c \ll V_d$ , en la primera etapa de compresión, la cañería no se llena de agua. Según la relación entre los valores de  $V_c$  y  $V_d$ , la cañería se ceba en una etapa mas o en varias etapas más. Supongamos, para seguir con el funcionamiento, que  $V_c \gg V_d$ . Entonces, al llegar al nivel inferior, (la cañería ya está entregando agua), se cierra la electroválvula y comienza la etapa de escape, la cámara queda comunicada con la atmósfera, de modo que el aire escapa y el agua ingresa a la cámara por TR1 hasta el nivel estático de la perforación. El agua en la cañería, no puede descender, porque se lo impide TR2. De esta manera, se completa un ciclo y la bomba ya esta lista para iniciar una nueva etapa de compresión. Debemos observar que; el trabajo entregado al aire para comprimirlo, se pierde porque se lo hace escapar a la atmósfera. Si la válvula, en la misma posición relativa, se coloca a una profundidad, apenas por encima de la cámara y nivel del agua, de modo que la tubería de aire forme parte del compresor – pulmón de aire comprimido, evitamos así el trabajo de compresión del aire contenido en la tubería y ahorramos energía.

## 1.2. Ensayos y resultados

Con el primer prototipo descrito se realizaron once ensayos. Los mismos se detallan en la Tabla 1.

<b>Tabla 1</b>									
<i>Valores característicos sobre el funcionamiento de la bomba individual (un cuerpo, figura 1) para las primeras once experiencias a una misma cota de 0,5 metros de agua por encima de la bomba.</i>									
#	H [m]	P <sub>t</sub> [atm]	C [l/h]	CC [l]	E <sub>c</sub> [W-h]	E <sub>l</sub> [W-h/l]	T [s]	T <sub>p</sub> [s]	T <sub>a</sub> [s]
1	1,0	0,8	372	0,38	0,093	0,24	3,7	2,5	1,2
2	1,0	1,2	384	0,38	0,098	0,28	3,5	2,5	1,0
3	1,0	1,5	398	0,38	0,102	0,30	3,4	2,5	0,9
4	1,0	2,0	420	0,38	0,123	0,32	3,2	2,5	0,7
5	6,4	1,2	327	0,38	0,143	0,40	3,5	2,5	1,0
6	6,4	2,0	410	0,38	0,176	0,46	3,3	2,5	0,8
7	6,4	3,0	415	0,38	0,200	0,52	3,2	2,5	0,7
8	6,4	4,0	427	0,38	0,186	0,53	2,9	2,5	0,4
9	13	2,0	334	0,38	0,220	0,58	4,0	2,5	1,5
10	13	3,0	384	0,38	0,270	0,71	3,6	2,5	1,1
11	13	4,0	404	0,38	0,310	0,81	3,4	2,5	0,9

H [m]: profundidad  
P<sub>t</sub> [atm]: presión de trabajo (relativa)  
C [l/h]: caudal  
CC [l]: caudal por ciclo  
E<sub>c</sub> [W-h]: energía por ciclo  
E<sub>l</sub> [W-h/l]: energía por litro  
T [seg]: tiempo de cada ciclo  
T<sub>p</sub> [seg]: tiempo pasivo de cada ciclo (no se entrega agua)  
T<sub>a</sub> [seg]: tiempo activo de cada ciclo (se entrega agua)

Luego, con el mismo prototipo se realizaron trece nuevas experiencias, en los cuales para distintos valores de profundidad hasta treinta metros, de modo de hacer ensayos, mediciones y observar el funcionamiento de los tiempos de carga y descarga de la cámara en función del nivel del agua de la perforación y presión de trabajo, con ello se encontró que los tiempos de carga para los distintos parámetros fueron los siguientes: (medido por encima de la parte superior de la cámara)

- nivel 1 cota 0,00 m – tiempo de carga 3,00 seg.
- nivel 2 cota 0,50 m – tiempo de carga 2,50 seg.
- nivel 3 cota 1,00 m – tiempo de carga 1,20 seg.

- nivel 4 cota 1,50 m – tiempo de carga 1,00 seg.

- nivel 5 cota 1,75 m – tiempo de carga 0,90 seg.

Con estos valores se encontró una disminución considerable de 2,5 seg. Tiempo de carga para cota N°2 con 0,50 m por encima del nivel superior, a un segundo de tiempo de carga para una cota de 1,5 m.

Se comenzó a trabajar con el nivel cuatro con cota a 1,50 m con un tiempo de carga de 1 seg y a alturas entre un metro y treinta metros encontrándose para la misma presión de extracción y a una misma altura, aumento en el caudal de extracción entre un 70% a un 90% obteniéndose caudales alrededor de los 750/850 litros de agua por hora con una cámara de treinta y ocho cm<sup>3</sup>.

**TABLA 2**  
*Valores característicos sobre el funcionamiento de la bomba individual (figura 1) para trece experiencias a nivel 2 (N2) y nivel 4 (N4)*

	H [m]	P <sub>t</sub> [atm]	C [l/h] N2	C [l/h] N4	E <sub>t</sub> [Wh/l]	T [seg] N2	T [seg] N4	T <sub>a</sub> [seg]
1	1	0,8	372	630	0,24	3,70	2.20	1,20
2	1	1,2	384	684	0,28	3,50	2.00	1.00
3	1	1,5	398	720	0,3	3,40	1.90	0,90
4	1	2	420	804	0,32	3,20	1.70	0,70
5	6,4	1,2	327	684	0,4	3,50	2.00	1.00
6	6,4	2	410	760	0,46	3,30	1.80	0,80
7	6,4	3	415	804	0,52	3,20	1.70	0,70
8	6,4	4	427	977	0,53	2,90	1.40	0,40
9	13	2	334	567	0,58	4.00	2.50	1,50
10	13	3	384	652	0,71	3,60	2.20	1,10
11	13	4	404	720	0,81	3,40	1.90	0,90
12	20	4	330	594	0,75	3.80	2.30	1.30
13	30	6	320	559	0.98	3.95	2.45	1,45

Este aumento en el caudal de extracción de agua por hora, se debe a la disminución de los tiempos tanto de carga como de descarga es necesario conocer con exactitud el tiempo de carga de la cámara que está introducida en el agua de la perforación como así también el tiempo de expulsión del mismo, aunque este dependerá en buena medida de la presión de aire comprimido que se le esta inyectando. Con estos valores se programa un PLC para que comande la electroválvula. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para diversas experiencias.

Por otra parte, la pequeña profundidad del ensayo y consecuentemente la pequeña energía útil puesta en juego, hacen resaltar las pérdidas locales en válvulas de retención, etc.

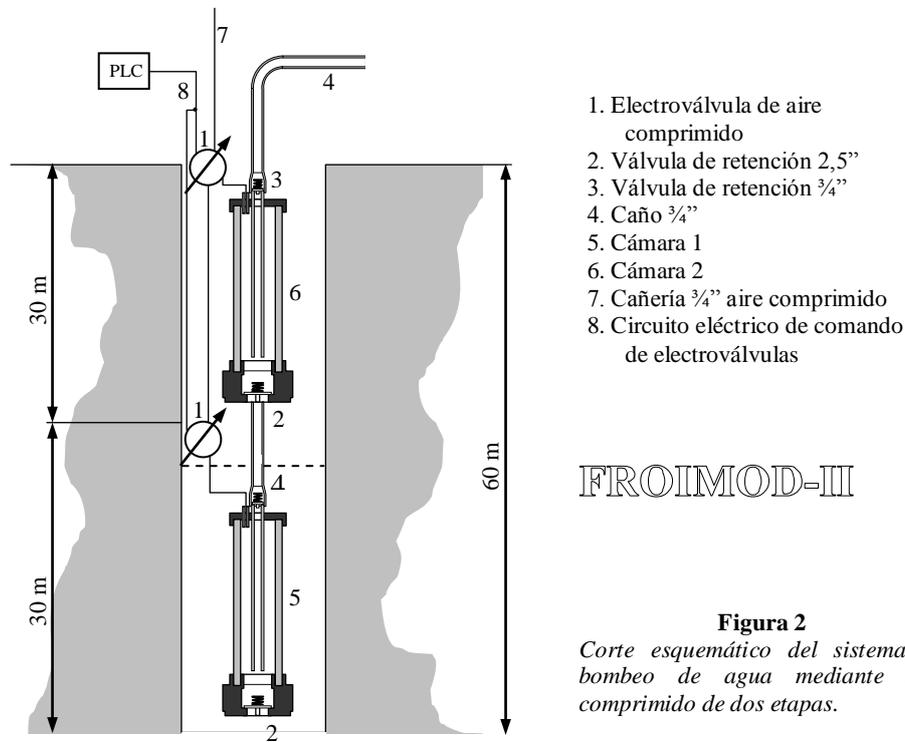
### 1.3. Ventajas y conclusiones de la bomba

La principal ventaja de la bomba, es la de no tener partes complejas o partes móviles sumergidas, salvo dos simples válvulas de retención; su parte más compleja es el compresor, que esta en el ámbito del nivel del suelo, por lo cual es muy accesible para su mantenimiento o reposición. Su estructura es muy simple y también su funcionamiento.

La primera y principal conclusión de los ensayos es que la bomba en su conjunto funciona correctamente en todas sus partes, de acuerdo a lo previsto. De los ensayos, surge también, que sumergiendo más la cámara, se reduce el tiempo de carga y se consigue aumentar el

caudal. Vemos que para extracciones de 30 metros la presión varía entre 4 a 6 Kg/cm<sup>2</sup>, y para más profundidad la presión aumentará considerablemente.

Es por ello que se ha diseñado un nuevo sistema de extracción para profundidades mayores que esta, colocando una segunda cámara a treinta metros por encima de la anterior. En la Figura 2 se presenta un esquema global para la extracción de agua a profundidad con este sistema.



**Figura 2**

*Corte esquemático del sistema de bombeo de agua mediante aire comprimido de dos etapas.*

A través de un PLC (marca SIEMENS LOGO 230RC 6 entradas 4 salidas) se comandan las dos válvulas de aire comprimido, de apertura y cierre, (Ref. 1) una ubicada a 60 metros de profundidad en la cámara (Ref. 5) y la otra ubicada a 30 metros en la segunda cámara (Ref.6). La secuencia de ambas cámaras es la siguiente:

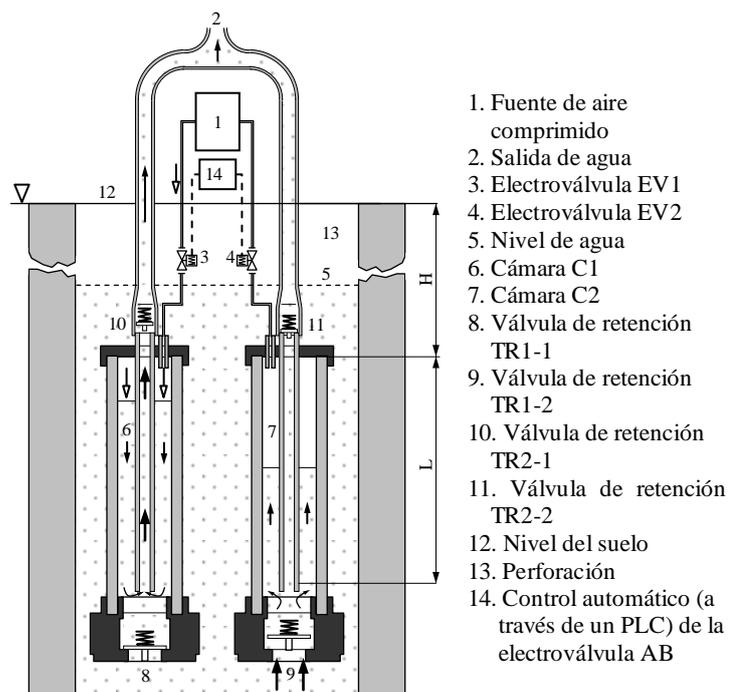
Cuando la cámara 2 (Ref. 5) se encuentra sumergido dentro del agua, 1,50 metros por debajo de la misma, tarda 1 segundo en cargarse de dicho elemento, en ese mismo instante la cámara 1 (Ref.6) a través del PLC y de la electroválvula (Ref.1) le inyecta una cierta cantidad de aire comprimido a una presión de 4-6 Kg/cm<sup>2</sup> y expulsa el agua a la superficie. Luego de un segundo el PLC corta la energía de la electroválvula de la cámara 1 (Ref.6) y energiza la electroválvula de la cámara 2 (Ref.5) inyectando aire comprimido al mismo a la misma presión, de este modo se carga la cámara 1 (Ref. 6) y luego corta la energía a la electroválvula y energiza la otra y así sucesivamente. Es decir que el tiempo de impulsión de la cámara 1 (Ref.6) es el mismo tiempo de carga de la cámara 2 (Ref.5) y el tiempo de carga de la cámara 1 (Ref.6) es el tiempo de impulsión de la cámara 2 (Ref.6), todo esto combinado para que funcione armónicamente con el PLC, regulando y programando los distintos tiempos de carga y descarga de ambas cámaras.

Con ello logramos trabajar con menores presiones de aire comprimido tanto en la expulsión del agua como la generación de aire comprimido (entre 4 a 6 Kg/cm<sup>2</sup>) ya que para extraer agua a 60 metros de profundidad con una sola cámara, necesitaríamos entre 8 a 10 Kg/cm<sup>2</sup> de presión de aire comprimido. Todas estas experiencias se están realizando con simuladores de profundidad a través de distintas válvulas de escapes previamente seleccionadas y calibradas para poder así controlar los distintos tiempos de impulsión y de carga de ambas cámaras como también regular las presiones de trabajo, para que con todos estos datos encontrar la potencia eléctrica necesaria para la extracción de agua a distintas profundidades. Del análisis del

funcionamiento, surge claramente que se trabaja con presiones que son la mitad de las presiones necesarias cuando se tiene la segunda cámara.

En los anteriores modelos ensayados de la bomba neumática (figuras 1 y 2), existía el inconveniente que debido a la intermitencia propia entre el ciclo de carga y descarga se producía un caudal de agua que era discontinuo. Este inconveniente se transformó en el objetivo que se trató de solucionar a través del estudio de una nueva disposición para la bomba neumática existente. Básicamente el mismo consiste en asociar dos bombas en paralelo (Figura 3), de manera que cuando una bomba se halle en la etapa de carga la otra esté en la etapa de descarga y viceversa. De esta manera se logra satisfacer el objetivo básico que era el de obtener un caudal de agua prácticamente continuo, por ende por también se logra un mayor caudal, comparado con una sola bomba en el mismo periodo de tiempo.

El nuevo prototipo tiene dos cámaras, C1 y C2 que están en paralelo sumergidas en el agua, comunicadas entre sí por la tubería de expulsión de agua a la superficie a través de dos válvulas de retención (en las salidas de cada cámara, TR2-1 y TR2-2) y una T, cada una de las cámaras se carga de agua independientemente por medio de una válvula de retención TR1-1 y TR1-2 que deja ingresar agua y una vez equilibrados los niveles se cierra automáticamente. La posición de ambas cámaras con respecto al nivel estático de la perforación deberá ser siempre en estos casos 1,5 (+0.3) metros por debajo de la misma ya que a esa profundidad (1,5 metros) el tiempo de carga de ambas cámaras tiene que ser igual



### FROIMOD-III

**FIGURA 4**

*Croquis esquemático de la bomba neumática FROIMOD III (dos cámaras en paralelo) indicando las partes principales y los componentes de la misma. La finalidad de esta disposición es evitar que el flujo de agua sea intermitente, transformándolo prácticamente en continuo.*

entre sí, dato fundamental para programar el PLC. El tiempo de descarga o de impulsión del agua a la superficie también tiene que ser igual entre ambas cámaras, pero en gran parte la

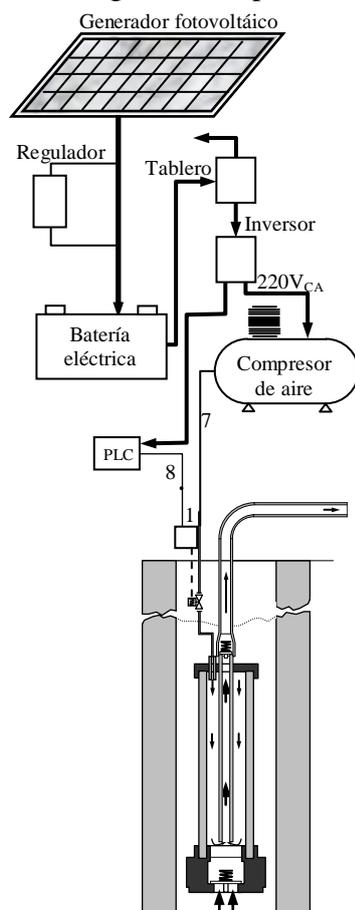
expulsión del agua de las cámaras, dependen de la presión que se le imponga a cada una de las mismas a través de las electroválvulas EV1 y EV2. El prototipo FROIMOD-III esta diseñado para profundidades entre 1 y 30 metros aproximadamente, de modo de hacer ensayos, mediciones y observar el funcionamiento de los tiempos de carga y descarga del dispositivo de doble cámara en función del nivel estático de la perforación y de la presión de trabajo. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

	H [m]	P <sub>t</sub> [Pa] 10 <sup>6</sup>	C [m <sup>3</sup> /s] 10 <sup>-7</sup>	C [m <sup>3</sup> /s] 10 <sup>-7</sup>	E <sub>i</sub> [J/m <sup>3</sup> ] 10 <sup>-6</sup>	E <sub>i</sub> [J/m <sup>3</sup> ] 10 <sup>-6</sup>	T <sub>c</sub> [s]	T <sub>d</sub> [s]	T [s]	% A
1	1,0	0,121	1899,94	3805,44	1,008	2,088	1,00	1,00	2,00	100,00
2	6,4	0,121	1899,94	3791,56	1,440	2,952	1,00	1,00	2,00	99,56
3	13,0	0,313	1838,83	3694,34	2,556	5,040	1,00	1,00	2,00	100,00
4	20,0	0,454	1694,39	3472,12	2,700	5,580	1,00	1,00	2,00	100,00
5	30,0	0,686	1730,50	3458,23	3,528	7,164	1,00	1,00	2,00	99,8

## 2. SISTEMA FOTOVOLTAICO

### 2.1. Descripción y funcionamiento

En la figura 4 se presenta un esquema global para la extracción de agua a profundidad,



1. Electroválvula de aire comprimido
2. Válvula de retención 2 ½"
3. Válvula de retención ¾"
4. Caño ¾"
5. Cámara 1
6. Cámara 2
7. Cañería ¾" aire comprimido
8. Circuito eléctrico de comando de electroválvulas

**Figura 4**

*Corte esquemático del sistema de bombeo de agua mediante aire comprimido de una etapa integrado con la parte de generación eléctrica a través de energía solar.*

aplicado a una zonal rural dispersa. La generación de energía eléctrica es obtenida mediante la utilización de paneles solares, para cargar las baterías a través de un regulador de voltaje; luego con un conversor de corriente y elevador de tensión generamos aire comprimido y damos tensión a un PLC (marca SIEMENS LOGO 230RC 6 entradas 4 salidas) para comandar las electroválvulas de aire comprimido, de apertura y cierre.

Para determinar el sistema fotovoltaico nos basamos en los puntos presentados anteriormente: la utilización de un sistema de extracción de agua subterránea mediante la aplicación de una bomba neumática, y la determinación de los recursos solares para una determinada región del país (V. Mercedes - San Luis). La finalidad es poder evaluar económicamente en conjunto esta alternativa para el suministro de agua potable específicamente aplicada a una zona aislada basada en la utilización de la energía solar. Además se efectuó una comparación técnica-económica con otros tipos de energías y sistemas tradicionales, de manera de ofrecer a potenciales usuarios, una herramienta que les ayude a tomar decisiones sobre la conveniencia o no de un sistema adoptado para el abastecimiento de agua.

## **BIBLIOGRAFIA**

- DIGENNARO J., RODRIGO V., ROSSI, A. (1997)– Bomba de aire comprimido para la extracción de aguas subterráneas en la zona de V. Mercedes (San Luis) - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **1**, 2, 189-192
- DIGENNARO J., RODRIGO V., RIBOTTA, S. y MONASTEROLO R. (1998) – Bomba de aire comprimido para la extracción de aguas subterráneas en la zona de V. Mercedes (San Luis) - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **2**, 2, 06.37–06.40
- DIGENNARO J., RODRIGO V., RIBOTTA, S. y MONASTEROLO R. (1999)– Bomba de aire comprimido para la extracción de aguas subterráneas en la zona de V. Mercedes (San Luis) - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **3**, 2, 07.33-07.36
- MATAIX C. (1978) – Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas – Harper & Row Publishers Inc.