

I - 5

EXPERIMENTOS CON UNA POZA SOLAR

L.R. Saravia

L.A. Bruné

C. Bakeman

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS EXACTAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA  
BUENOS AIRES N° 177  
4400 - SALTA  
Argentina

SUBVENCIONADO PARCIALMENTE POR EL CONICET

RESUMEN

Las pozas solares constituyen uno de los colectores potencialmente atractivos para la colección de energía solar a gran escala, debido a su bajo costo de construcción y a la acumulación intrínseca de calor que ellas poseen. En el noroeste argentino, la existencia de grandes salinas, los altos niveles de radiación y las posibilidades de desarrollo de esa región en base a un potencial minero, hacen atractivo el estudio de las pozas solares con el fin de adaptarlas a las necesidades locales.

En este trabajo se describen los primeros resultados obtenidos con un prototipo de poza solar de pequeñas dimensiones,  $16 \text{ m}^2$  de superficie y  $0,85 \text{ m}$  de profundidad, destinado a ensayar soluciones para los distintos problemas que plantea el funcionamiento a plazos largos de una poza.

## 1.- INTRODUCCION

La poza solar, en la cual el fondo negro de una piscina recibe la radiación solar y una solución salina con gradiente de concentración evita la formación de corrientes de convección, fué inicialmente ensayada por Tabor (1). Ella ha sido objeto de diversos estudios teóricos y experimentales, (1 - 6), atrayendo la atención de los investigadores por la combinación de bajo costo de construcción y alta eficiencia intrínseca que ella supone.

Si bien ha quedado establecida experimentalmente la factibilidad de su funcionamiento, se realizan ensayos tendientes a buscar soluciones para los diversos problemas técnicos que presenta su trabajo en períodos largos. En la región noroeste de la Argentina, la existencia de grandes salinas, los altos niveles de radiación y la posibilidad de desarrollo de estas regiones en base a su potencial minero, hacen atractivo el estudio de las pozas solares con el fin de adaptarse a las necesidades locales.

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos en los primeros ensayos de un prototipo de poza solar de pequeñas dimensiones. En la sección 2 se describen someramente las propiedades térmicas de una poza y en la 3 se hace algo similar con los detalles de diseño. En la sección 4 se describe la poza ensayada. Finalmente, en la sección 5, se dan los resultados obtenidos hasta el presente y se discute la experiencia resultante en relación con distintos problemas técnicos.

## 2.- RÉGIMEN TÉRMICO DE UNA POZA SOLAR

Weinberger y también Rabl y Nielsen (5 - 6) han propuesto estudios analíticos del régimen térmico en una poza solar. Interpretando la radiación incidente como la suma de una componente estacionaria  $H_0$  y de una sinusoidal  $H_1 \cos(\omega t)$ . Dado  $\omega$  es la frecuencia circular anual, se puede calcular la componente estacionaria de la temperatura de fondo  $T_0$  y su primer armónica  $T_1 \cos(\omega t - \phi_1)$ . La relación entre  $T_0$  y  $H_0$  depende del porcentaje de calor extraído en el fondo,  $\eta$ , respecto del total incidente y tiene la forma:

$$T_0 = T_a + \frac{H_0}{K_w} \left[ \sum_1 \frac{\rho_i}{\mu_i} (1 - e^{-\mu_i l}) \right] - \eta \quad (1)$$

Donde  $T_a$  es la temperatura en la superficie de la fosa, la que se supondrá igual a la temperatura anual media.  $\eta$  es el coeficiente de transmitancia de la superficie,  $l$  la profundidad de la poza y  $K_w$  la constante de conductividad térmica del agua. La dependencia del espectro solar con la longitud de onda se ha dividido en intervalos  $i$ , donde se supone el coeficiente de absorción del agua,  $\mu_i$ , constante y se admite que el porcentaje de radiación contenido es  $\rho_i$ . En la fig. 1 se mues-



tra la diferencia de temperatura  $T_0 - T_s$  como función de  $H_0$  y  $n$  para una profundidad de poza de un metro y un coeficiente de reflectancia de 0,9. Los valores de  $\mu_1$  y  $\rho_1$  utilizados en el cálculo son los propuestos por Rahl y Nielsen.

Con el fin de estimar las posibilidades de uso en la Argentina, en la fig. 2 se dan las curvas de radiación incidente en la zona de la puna, en la ciudad de Salta y en la Ciudad de Mendoza. De los valores medios obtenidos, entre 420 y 650 ly/día, se aprecia que es razonable esperar rendimientos entre el 29 y el 33 %, para un incremento de temperatura de 40 grados centígrados.

En estos cálculos se han despreciado las pérdidas laterales de calor. Para una poza con una dimensión horizontal lineal  $a$ , el descenso de temperatura provocado por las pérdidas es del orden de  $1/a$ , para pérdidas pequeñas. Se necesitarán dimensiones del orden de los 20 metros para que este factor pierda importancia.

Aquí no consideraremos en detalle las variaciones anuales de radiación y su influencia en la temperatura de fondo, lo que dependerá en mucho del régimen de extracción que se planea. Las variaciones diarias de radiación se notan muy poco, provocando caídas de temperatura del orden de los 2 grados.

La temperatura obtenible en el fondo depende de la profundidad  $l$  de la poza. La fig. 3 muestra esa dependencia para distintos rendimientos de extracción y un valor dado de radiación incidente. Se puede apreciar que para rendimientos que oscilan entre 29 y 33 % las profundidades que aseguran máxima temperatura de fondo oscilan entre 1 y 1,30 metros. Este cálculo fué realizado para incidencia normal del haz solar. Teniendo en cuenta que la incidencia durante la mayor parte del año no es normal, aumentando el recorrido del haz solar dentro del agua, se justifica una elección final de la profundidad que está en el orden del metro.

### 3.- PROBLEMAS TECNICOS DE DISEÑO

El primer aspecto a considerar en el diseño es la elección de la sal que formará el gradiente. Aquí puede pesar mucho la disponibilidad local de sal. El uso de la sal más abundante, NaCl, fué inicialmente desechado por no haberse logrado estabilidad (5). Posteriormente se comprobó que esto no era cierto. Ella tiene la ventaja de su bajo costo, lo que es importante ya que su compra representa gran parte del costo inicial del sistema. En cambio su difusividad es alta, lo que aumenta los costos de mantenimiento. En algunos casos en los que se disponía localmente de  $MgCl_2$ , se ha utilizado con ventajas debido a que presenta mejores condiciones de estabilidad. Se ha mencionado, aunque hasta ahora no se ha utilizado extensamente, el uso del  $KNO_3$  que teniendo un cambio grande de solubilidad con la temperatura, permitiría mantener el gradiente con difusividad nula, simplificando en mucho los sistemas de control (6).

El mantenimiento del gradiente en los casos de difusividad no nula se puede lograr por dos métodos: agregar solución concentrada al fondo y lavar la superficie con agua, o tomar solución del fondo, reconcentrarla y volverla al fondo a la vez que también se lava la superficie. En el segundo caso, no habiendo agregado de agua al fondo, se logra mantener una distribución lineal de concentraciones. En el primer caso, la distribución se vuelve exponencial.

Junto a esta problema debe considerarse la preparación del gradiente dentro de la poza cuando se inicia su funcionamiento. Esto se puede hacer por capas en vez de procurar una distribución continua. De cualquier manera se necesitarán tanques auxiliares para la preparación de soluciones concentradas, su eventual decantación para retirar impurezas, y su mezcla para conseguir las densidades de cada una de las capas a colocar. La alimentación de las capas se puede realizar sin perturbar la mezcla entre ellas si se procura que la solución desparezca suavemente y el gasto no exceda valores máximos.

El segundo aspecto a considerar es la construcción de la piscina. Dado que no es necesario colocar aislación térmica en el fondo, se puede proceder directamente a la nivelación de la superficie del terreno, la construcción de las paredes perimetrales y el recubrimiento con una película plástica que impida filtraciones de la solución y que absorba la radiación solar. La elección del recubrimiento estará basada en las condiciones de durabilidad ante una combinación de factores tales como temperatura y ataque por parte de la solución y la radiación solar. Debe tenerse en cuenta que estos factores no se presentan en condiciones extremas ya que la temperatura es regulada por la extracción y no existen variaciones bruscas debido a la inercia de la poza. Por otra parte, la radiación ultravioleta es absorbida parcialmente por el agua. Plásticos como el PVC y el polietileno han sido tenidos en cuenta. En la construcción debe considerarse además la constitución del suelo. La existencia de corrientes subterráneas puede variar en mucho las condiciones de acumulación. La existencia de sustancias orgánicas debe contemplarse a efectos de evitar el crecimiento de organismos productores de gases, lo que se encuentra favorecido por el aumento de temperatura (4). El tamaño que se adopte para construir las unidades dependerá del sistema constructivo y de los sistemas de extracción del calor y renovación de las soluciones.

El tercer aspecto a tener en cuenta es la elección de un sistema de extracción del calor. Si se desea calentar un líquido, típicamente agua, en principio caben tres soluciones. En una, se puede extender en el fondo de la poza una red de cañerías por las que circule el agua. Una alternativa radica en la extracción de la capa caliente con bomba y el uso de un intercambiador convencional para calentar el agua. El sistema es muy compacto, permite aprovechar con la mayor eficiencia la superficie de intercambio, da lugar al control de la corrosión en el



intercambiar y podría ser combinado con el sistema de mantenimiento del gradiente de la poza. Otra alternativa consiste en el uso de una partición o bolsa de plástico en el fondo de la poza, por dentro de la cual circulará el agua a una presión ligeramente mayor que la producida por la solución. Si lo que se busca es el calentamiento del aire, se necesitan superficies de intercambio grandes, del orden de la superficie de la poza. Una posible solución consiste en la construcción de una cámara de aire por debajo de la poza, la que se rellena con cantos rodados para transmitir el peso del volumen de líquido hasta el suelo. El aire circula entre los cantos rodados calentándose a través de una gran superficie de contacto con ellos. Todas las alternativas han sido esquematizadas en la figura 4.

El último aspecto de importancia es considerar lo relacionado con los agentes atmosféricos en la superficie de la poza. De acuerdo a las condiciones/particiones de cada caso, puede ser aconsejable la colocación de una cubierta de plástico transparente, ya sea flocando sobre la solución o sumergida algunos centímetros dentro de ella.

#### 4.- LA POZA CONSTRUIDA

La poza construida se esquematiza en la figura 5. Su superficie es cuadrada, con un lado de 4 metros y una profundidad de 0,85 metros. Las paredes de la poza son de manpostería. Debido a su pequeño tamaño, obsérvese que el área lateral es igual a la del fondo, se ha colocado aislación térmica. Se usó poliestireno expandido de 10 cm. de espesor y una densidad de 20 Kg/cm<sup>2</sup>. Sobre la aislación se colocó una manta de plástico PVC, de color negro y 250 micrones de espesor, fabricada con tiras de 80 cm. de ancho soldadas unas a otras. Dado que se piensa probar distintos sistemas de extracción, se dejó por debajo una cámara, la que se construyó colocando una capa de cantos rodados de 5 cm. de diámetro en un espesor de 35 cm. Por encima de los cantos se colocó una capa fina de metal con el fin de asentar el plástico. Bocas laterales permiten la entrada y salida del aire en la cámara.

En una segunda etapa se incorporó una cubierta de polietileno de 80 micrones de espesor, sostenida en los bordes según se detalla en la figura 6. Variando la altura de la última capa de agua se consigue que el plástico flote o quede sumergido en el agua.

Como sal se utilizó el NaCl, muy abundante localmente. Fue usado tal cual se lo extrae de las salinas, con un contenido de sal mayor de 98 %. Se colocaron 6 capas de solución, de 14 cm. cada una y densidades: 1,125; 1,100; 1,075; 1,050; 1,025 y 1,000. Con el fin de preparar la solución concentrada, se cons-

truyó al lado de la poza otro recipiente de 5800 litros de capacidad, recubierto con polietileno negro. La sal utilizada contiene algunas impurezas, especialmente ión hierro, que queda en solución coloidal no precipitando u oscureciéndola mucho. Dado que no se produjo decantación natural en un período de semanas, se procedió al tratamiento con sulfato de aluminio y sulfato de cobre. Colocando alrededor de 1 Kg del primero y 30 gr. del segundo, se obtuvo una solución muy ligada con un período de decantación menor de 24 horas.

La solución final, con la concentración de las capas sucesivas, se prepararon en un tanque de 500 litros, según se esquematiza en la figura 7, y se introdujeron en la poza vertiéndolas sobre una capa de madera de 20 x 20 cm., que flotaba en la solución evitando la mezcla de las capas sucesivas. Se verificó la ausencia de mezcla por medida directa en diversos puntos de la poza. El mantenimiento del gradiente se realiza en forma discontinua, agregando solución concentrada dos veces por semana.

El perfil de temperaturas fue medido en la poza mediante un conjunto de termoplas encapsuladas en vidrio. El perfil de densidades se controla mediante la extracción de muestras con tubos sumergidos a profundidades adecuadas.

#### 5.- Resultados obtenidos. Discusión

La poza se armó por primera vez durante el mes de Enero. La variación de temperaturas en el fondo a lo largo de ese mes se muestra en la figura 8. En ella se da, para cada día, la temperatura máxima obtenida, lo que ocurre alrededor de las 18 horas. Las variaciones diarias de temperatura dependen de la radiación incidente, oscilando entre los 3 y los 6°C. La llegada a régimen de la poza se logró en unos 15 días. En la figura 9 se aprecia el perfil de temperaturas una vez obtenido el régimen.

El funcionamiento de la poza se suspendió en el mes de febrero por razones que se explican más adelante, reiniciándose a principios de junio. Las variaciones de temperatura en el fondo, así como el perfil de temperaturas, se dan en las figuras 10 y 11.

El cálculo teórico de las curvas no se puede realizar con la expresión (1) debido a que las pérdidas laterales son altas. Es necesario recurrir a las expresiones obtenidas para una poza con pérdidas laterales, las que se han desarrollado en una publicación previa (7). En la figura 11 se ha superpuesto el cálculo del perfil de temperaturas de acuerdo a la radiación media recibida, la superficie y profundidad de la poza y la aislación colocada. Para el mes de junio, fue necesario tener en cuenta la inclinación de los rayos solares (alrededor de 45° al mediodía), que producen un doble efecto. Por un lado la pared norte corta un 25 % de la radiación incidente en el fondo de la pileta; si bien ella es reci-



bida por la pared sur, que se cubrió con plástico blanco, ésta dispersa la luz en todas direcciones y solo parte llega al fondo. Se estima en definitiva que este efecto corta cerca del 12 % de la radiación que llega, por lo que el coeficiente de transmisión se reducirá del 90 al 78 % a los efectos del cálculo. Por otro lado, el haz entra inclinado por lo que el camino recorrido para llegar al fondo es bastante más largo que en verano. Para tenerlo en cuenta se afectan los coeficientes de absorción en el factor correspondiente.

El acuerdo obtenido entre valores experimentales y teóricos es razonable teniendo en cuenta las aproximaciones realizadas. El efecto de las paredes laterales es muy importante y reduce en más del 50 % el salto de temperatura obtenible.

En lo que se refiere a los problemas técnicos que se han presentado, comenzamos con los relacionados a la preparación de la solución. La utilización de sal local es ventajosa desde el punto de vista económico pero debe tenerse cuidado con las impurezas contenidas, realizando ensayos previos. En nuestro caso fué necesario recurrir a un tratamiento análogo al utilizado en potabilización del agua para obtener una solución límpida. El tratamiento fué muy efectivo, de costo reducido y muy rápido, lo que es importante al permitir acelerar el proceso de formación de las capas. Este proceso se realizó en forma discontinua, en cargas de 500 lts. Se introdujo la solución a una velocidad de alrededor de 4 lts./min. por una sola boca, no presentándose en absoluto problemas de mezcla. Apenas se forman las dos primeras capas, se hace sentir el efecto del calentamiento, por lo que no es posible comenzar las medidas a una temperatura uniforme. En nuestro caso, al comenzar éstas, ya existía un salto de temperatura de 15°C entre superficie y fondo, aunque esto desde el punto de vista de la experimentación es incómodo, no tiene consecuencias prácticas. El mantenimiento del gradiente se realiza en forma discontinua y el tiempo de experimentación ha sido corto como para sacar conclusiones acerca de posibles problemas que puedan presentarse.

El recubrimiento de plástico no ha tenido problemas en los seis meses en los que ha estado bajo el sol y el agua. La integridad y la flexibilidad de la capa lucen inalteradas. El espesor de 250 micrones parece ser menor que el conveniente en lo que se refiere a su manipuleo durante la colocación. El material se vuelve muy flexible con la temperatura, por lo que resulta importante apoyarlo bien antes de empezar a cargar la poza.

Durante el primer período de funcionamiento, no se produjeron crecimientos orgánicos de importancia, salvo en los primeros centímetros de profundidad, donde el agua no tiene sal. Allí apareció algún crecimiento gelatinoso en las paredes y algunos insectos que siguieron reproduciéndose en el agua. Te

niendo en cuenta esto, en el segundo período se le agregó a la última capa, algunos gramos de sulfato de cobre lo que ha impedido hasta el momento dicho crecimiento.

No obstante debe esperarse el verano para sacar conclusiones finales al respecto, ya que durante esos meses la temperatura superficial de la poza es de alrededor de 20° mayor que en invierno, favoreciendo en mucho el crecimiento orgánico.

En lo que se refiere a los agentes atmosféricos, se tuvo la oportunidad de probar la acción de la lluvia durante el mes de enero, cuando llegó a recibir 130 mm de agua en un período de 4 horas, estando la poza sin cubierta superficial. El efecto desde el punto de vista del gradiente no se hizo notar, ya que la acción de las gotas solo produce movimiento en los primeros centímetros. Desde el punto de vista térmico, el efecto es ligeramente adverso debido a que se enfría un poco la capa superior. No hubo ocasión de observar la acción del granizo. En cambio el polvo, muy abundante debido a las construcciones cercanas ha mostrado ser un problema más serio al cubrir el fondo en un mes, lo que provoca la disminución de la absorción de radiación en el fondo. Por tal razón se decidió parar el funcionamiento en febrero, limpiar la piscina y rearmarla con una cubierta. Esta puede dejarse flotando si se desea evitar la evaporación del agua, lo que puede ser importante en lugares altos y secos. De lo contrario, puede sumergirse, lo que disminuye el efecto de los vientos y facilita la limpieza.

Sobre la extracción de calor aún no se ha recogido datos suficientes como para someterlos a una discusión.

#### 6.- Agradecimientos

Se agradece la colaboración del Departamento de Obras de la U.N.Sa. en la construcción de la poza, así como de los técnicos del Área de Física del Departamento de Ciencias Exactas, Sres. González y Meyer. También agradecemos la ayuda prestada por Divisional Salta de Obras Sanitarias de la Nación y en particular el asesoramiento técnico brindado por su Jefe, Ing. Damián Agüero.

Referencias

- 1) Tabor, H., Solar Development in Israel, Solar Energy II, N°3, p. 9, Oct. 1959.
- 2) Hirschmann, J, Supression of natural convection in open ponds by concentration gradient, Proc. First Int. Symp. Water Desal., Washington, 1955, p. 483.
- 3) Hirschmann J., Bases teoricas para el diseño de poz-as solares con soluciones acuosas de cloruro de magnesio, Conf. Los Ang. para el Estudio de zonas aridas, Buenos Aires, Set. 1963.
- 4) Tabor H., Large area solar collector for power production, Solar Energy, Vol. 7, N°4, p. 189, 1963.
- 5) Weinberger H., The Physics of the Solar Pond, Solar Energy, Vol. 8, N°2, p. 45, 1964.
- 6) Rabl a. and Nielsen C., Solar Ponds for Space Heating, Solar Energy, 1975.
- 7) Nielsen C. E., Rabl A., Watson J., and Weiller P., Maintenance of Solar Concentration Gradient in Solar Ponds, ISES Conference, Los Angeles, Agosto 1975.
- 8) Bruné L., Saravia, L. and Bekerman C., Modelo de Laboratorio de una poza solar, Segunda Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energía Solar, Salta, Julio 1976.

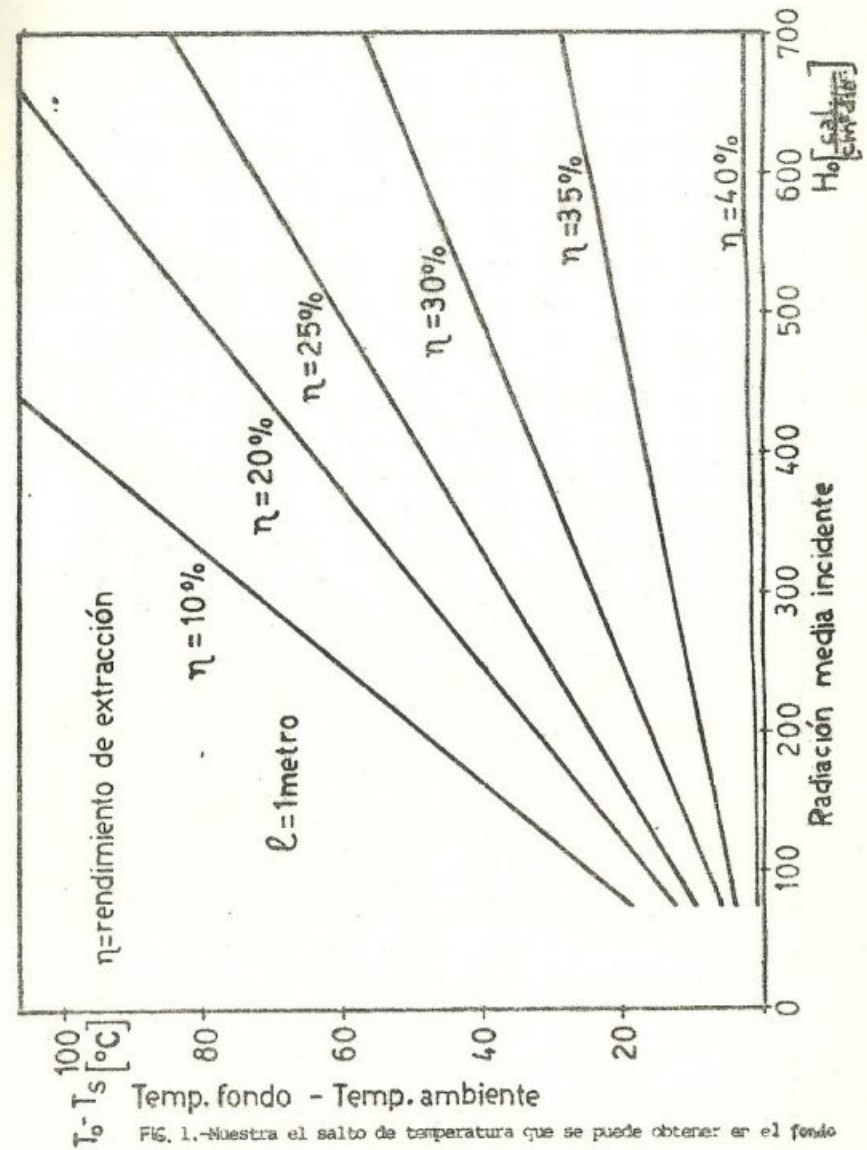


FIG. 1.-Muestra el salto de temperatura que se puede obtener en el fondo de la poza, como función del rendimiento medio de extracción y de la radiación media incidente, para una profundidad de poza de un metro.



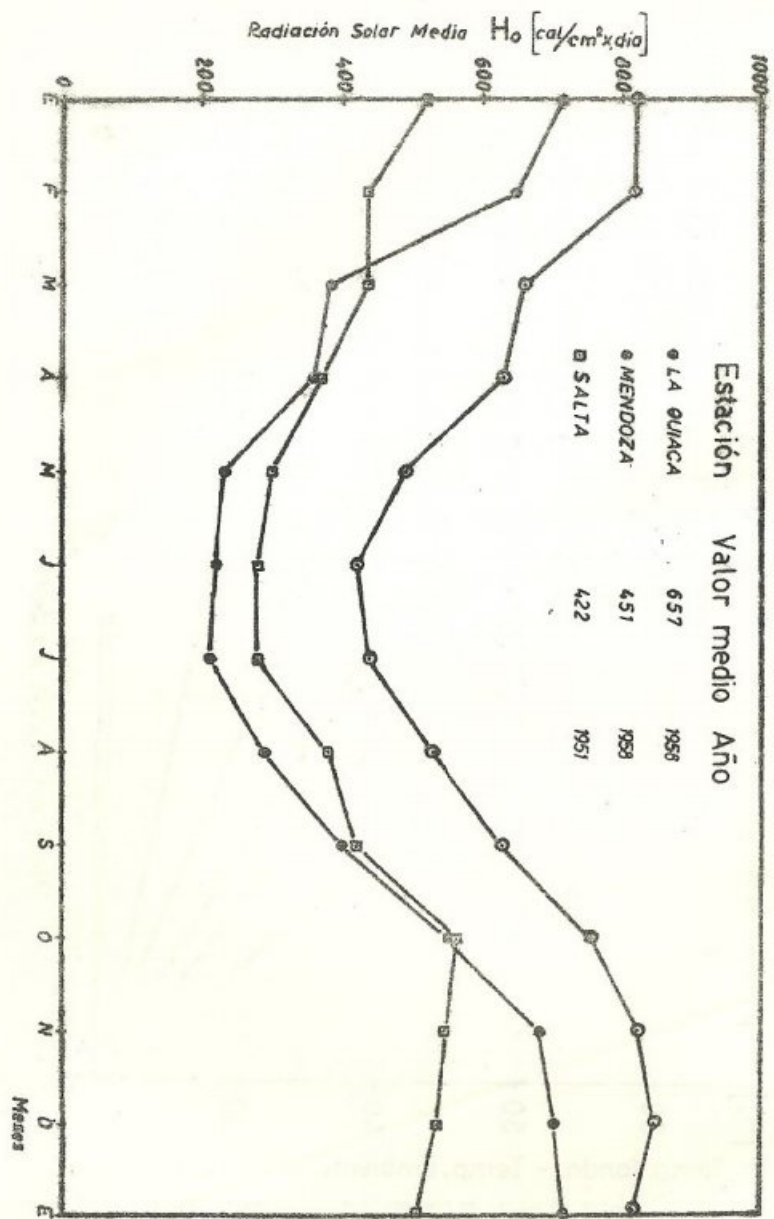


FIG. 2.- Muestra la radiación mensual media en tres localidades cerca de la región cordillerana.

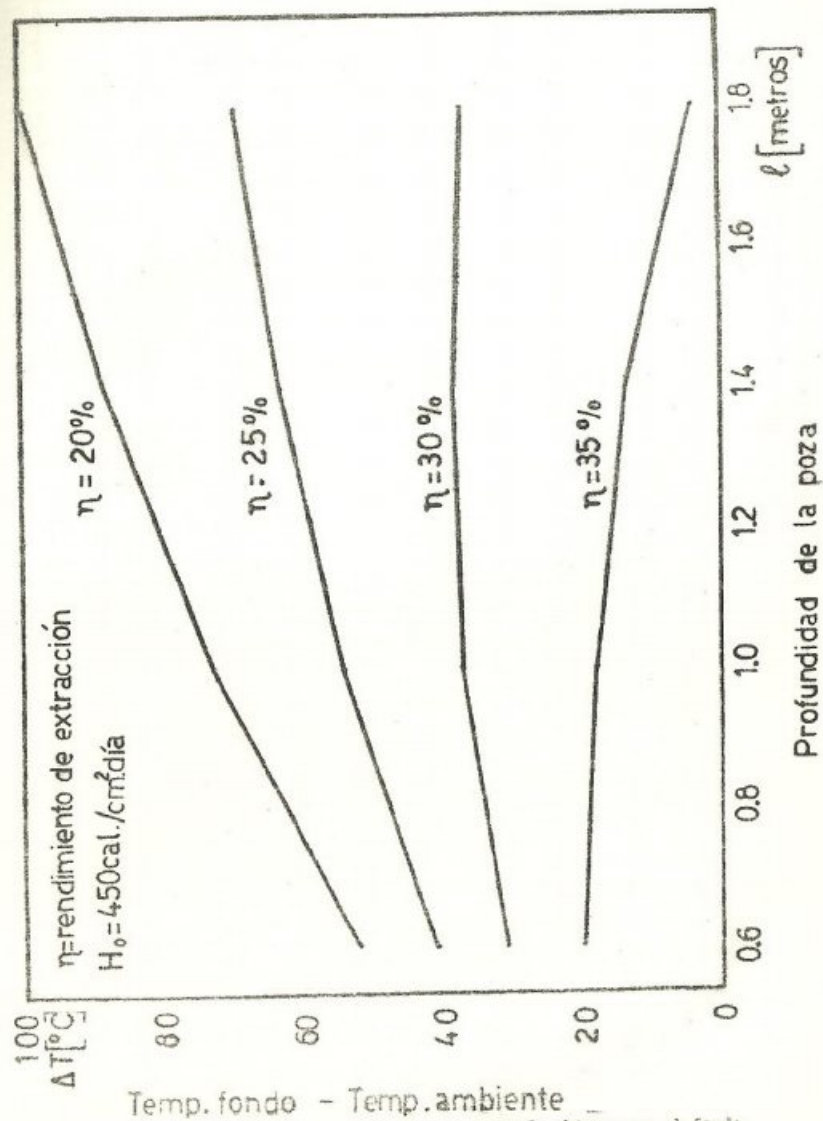


FIG. 3.- Muestra el salto de temperatura que se puede obtener en el fondo de la poza, como función del rendimiento radio de extracción y de la profundidad de la poza, para una radiación media incidente dada.

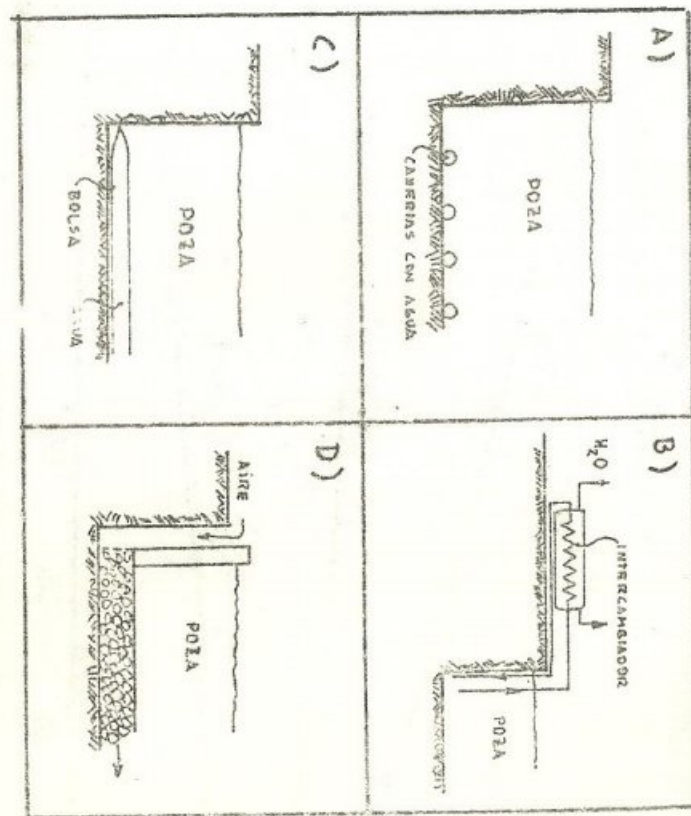


FIG. 4.- Muestra diversos tipos de excreción de calor de la poza, ya sea para calentamiento de agua o aire.

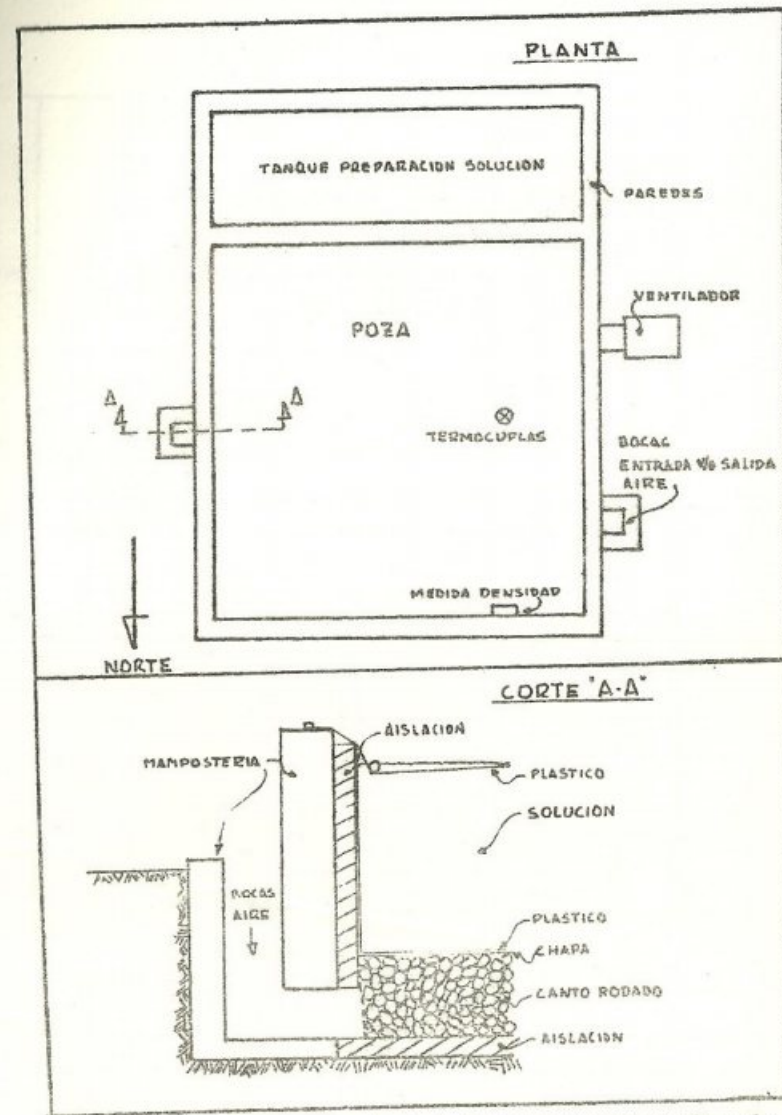


FIG. 5.- Muestra un corte y la planta de la poza construida con fines de experimentación. La longitud de un lado de la poza es de 4 metros.



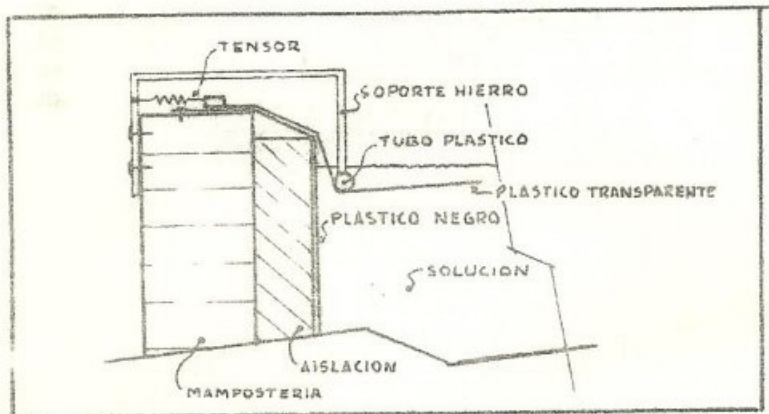


FIG. 6.- Muestra un detalle del soporte del plástico que cubre la poza.

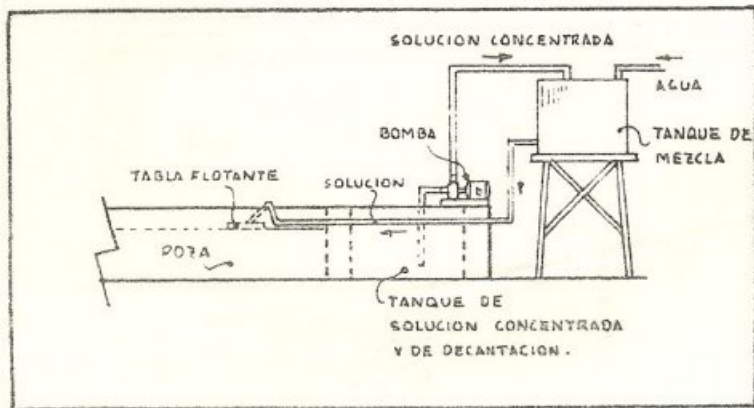


FIG. 7.- Muestra un detalle del sistema de cañerías que alimenta la solución a la poza.

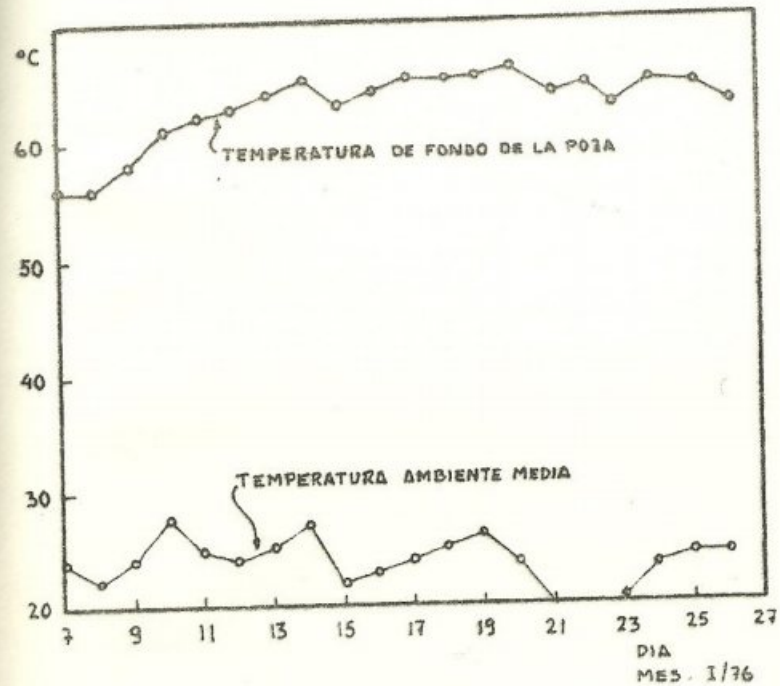


FIG. 8.- Muestra la temperatura de fondo obtenida en la poza durante el mes de enero de 1976. También se da la temperatura ambiente media.

FIG. 8.-

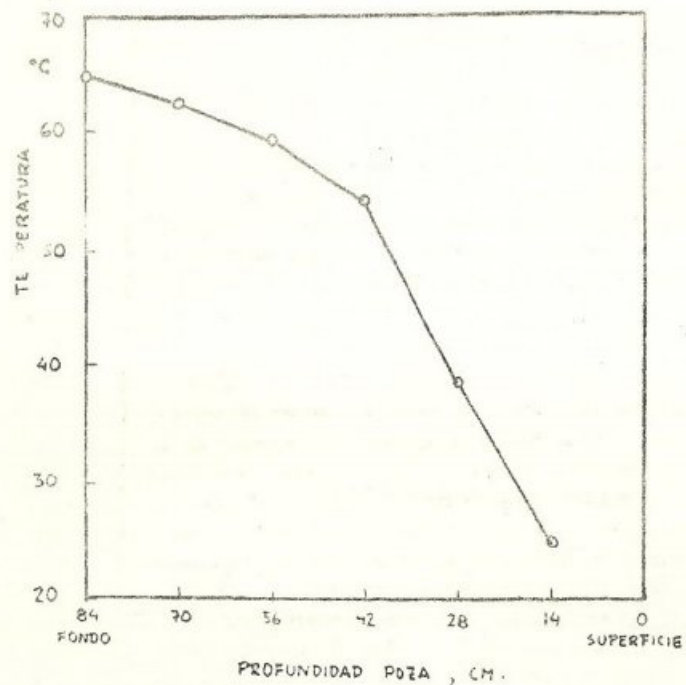


Fig. 9.- Muestra el perfil de temperatura de la poza, para un cierto día, como función de la profundidad.

Fig. 9.-

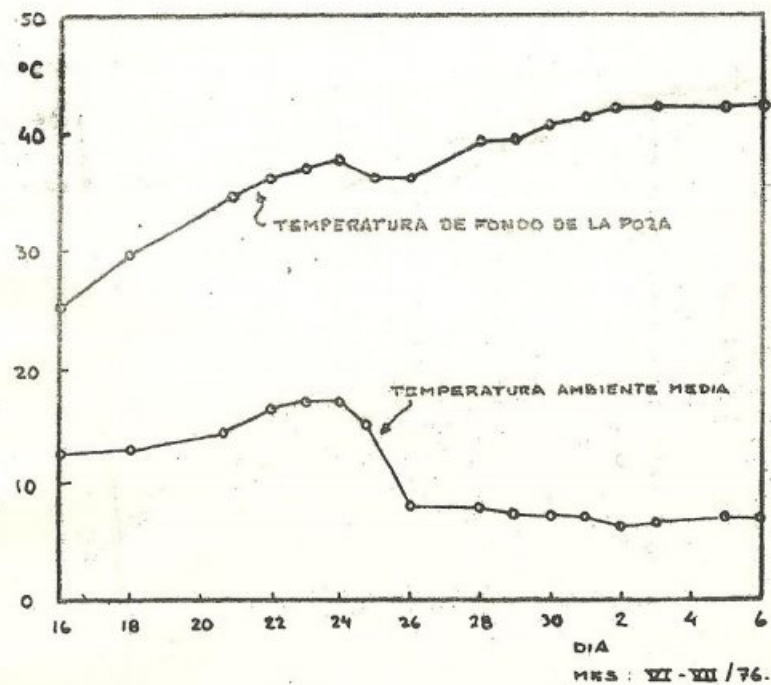


Fig. 10.- Muestra la temperatura de fondo obtenida en la poza durante los meses de junio y julio, así como la temperatura ambiente media.



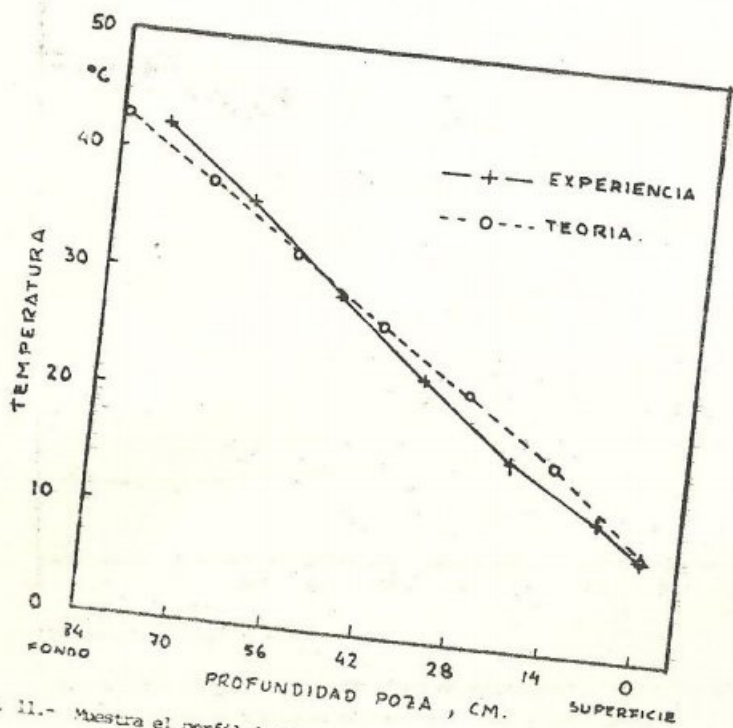


FIG. 11.- Muestra el perfil de temperatura, para un cierto día, como función de la profundidad de la poza. Se compara con el perfil obtenido teóricamente, teniendo en cuenta las pérdidas laterales de la poza.

76-11-