

## ASPECTOS TÉCNICOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA POZA SOLAR

L. Saravia<sup>#</sup>, G. Losino, C. Bekerman, D. Ragot<sup>\*</sup>  
Departamento de Ciencias Exactas  
Universidad Nacional de Salta  
4400 Salta, Argentina.

### Resumen.

Se analizan los distintos aspectos técnicos que hacen al funcionamiento de una poza solar, tales como: mantenimiento del gradiente de concentración y puesta en marcha del sistema, contaminación ambiental de la poza, alteración del gradiente superficial por acción de vientos, absorción de radiación en el fondo de la poza, extracción de calor. Se discuten estos aspectos en relación con la experiencia adquirida durante los últimos 20 meses, en el funcionamiento de una poza de 16 m<sup>2</sup> de superficie.

### 1.- Introducción.

Las principales ventajas de una poza solar como colector son: su bajo costo inicial, el sistema intrínseco de acumulación, el bajo grado de degradación por exposición solar de los materiales utilizados. Como desventaja debe citarse un rendimiento térmico modesto cuando la temperatura de colección se halla cerca de la ambiente.

También existen ciertas restricciones en cuanto a su uso que provienen de dos causas: la necesidad de cubrir extensiones relativamente grandes con un solo sistema para evitar pérdidas de calor laterales, y el tener que disponer de un sistema de ~~un sistema~~ auxiliar de mantenimiento del gradiente que requiere un cierto grado de atención técnica.

Dentro de este esquema general, las posibilidades de uso radican principalmente en el campo industrial y agrario, entre las cuales pueden mencionarse las siguientes, en el caso de la Argentina: 1) procesos de purificación de sales en la ex-

<sup>\*</sup>Cooperante técnico del Gobierno Francés.

<sup>#</sup>Investigador de la CNEGH.

plotación industrial de las salinas;

2) procesos de separación del uranio extraído en diversas minas localizadas en las cercanías de los Andes

3) calentamiento habitacional para grupos de casas relacionadas con explotaciones mineras en las zonas mencionadas;

4) secado a escala industrial de productos agrícolas tales como granos, tabaco, etc., especialmente si tienen características estacionales que aprovechen las posibilidades de acumulación del sistema;

5) integración dentro de las "granjas solar" como generador de calor para diversas funciones.

El uso de la poza solar en estas aplicaciones presenta características promisorias si se logra resolver adecuadamente algunos problemas técnicos cuya discusión forma la parte central de este trabajo. Mientras que en la mayoría de los colectores solares el funcionamiento a largo plazo depende intensamente de la adecuada selección de los materiales, este hecho es secundario para las pozas debido a que una pequeña capa de agua es capaz de actuar como un eficaz filtro de la radiación ultravioleta. En cambio, ellas requieren la solución de varios problemas técnicos de funcionamiento, algunos de los cuales están en discusión. En las secciones que siguen ellos serán planteados, detallándose la experiencia adquirida con una pequeña poza de 16 m<sup>2</sup> de superficie (que en adelante será llamada poza "S") cuya construcción ha sido explicada en un trabajo previo (1), así como la de otros autores (2,3,4). Los principales problemas son: generación y mantenimiento del gradiente salino, limpieza de la solución y del fondo de la poza, extracción de calor.

En lo que se refiere al régimen térmico, ha sido discutido en un trabajo previo (1), por lo que sólo se incluirán algunas consideraciones de interés en cuanto a posibles aplicaciones. El aspecto económico será objeto de alguna discusión a efectos de situar el orden de costos a esperar del sistema.

## 2.-El régimen térmico.

Se ha trabajado extensamente en el cálculo del perfil de temperaturas en una poza solar, ya sea por métodos analíticos aproximados que permiten obtener una idea clara de los div

Los fenómenos físicos que determinan el perfil (5,6), aunque no tienen en cuenta detalles como el cambio de las propiedades de la solución con la concentración, inclinación de los rayos solares, etc.; o con métodos numéricos más detallados (7,8).

Los perfiles calculados han sido reproducidos experimentalmente (2,4) en pozas de tamaño grande. Se han logrado temperaturas, sin extracción de calor, que llegan a 90°C en climas de irradiación fuerte (2) o a 62°C con menor radiación (4). En el caso de la poza 8 las pérdidas laterales son significativas debido a su pequeño tamaño y pese a la aislación térmica colocada, por lo que el análisis térmico debe tener en cuenta este factor (9). En la Fig.1 se muestran algunos perfiles de temperatura. Uno de ellos fue obtenido con termocuplas colocadas a distancias fijas. Con posterioridad se ha instalado una termocupla accionada con un motor sincrónico, la que desciende lentamente tomando un registro continuo. Una plataforma móvil permite la toma de registros en cualquier punto de la poza.

Hasta ahora no se han publicado experiencias detalladas de extracción de calor. Los rendimientos a obtener dependerán de la diferencia entre la temperatura de extracción  $T$  y la temperatura ambiente  $T_a$ , así como de la irradiación  $I$ . Al igual que en otros tipos de colectores, resulta ser una función de  $(T-T_a)/I$ , la cual se muestra en la Fig.2, para diversas profundidades, tal cual se obtiene del cálculo analítico (10). Se han agregado curvas para otros tipos de colectores. Los rendimientos más bajos, para pequeños valores de  $(T-T_a)/I$  son debidos a la absorción de la radiación infrarroja en los primeros centímetros de solución. Los rendimientos mayores a temperaturas más altas son debidos al carácter aislante de la capa de agua, tanto en el aspecto conductivo como radiativo.

La profundidad de la poza puede ser seleccionada para obtener el máximo rendimiento a una temperatura dada, obteniéndose valores del orden de 1 m. No obstante, pueden entrar a jugar otros criterios de acuerdo al tipo de aplicación. Así como Nielsen (6) han sugerido el uso de una mayor profundidad para aumentar la capacidad de acumulación, posibilitando la utilización para calefacción invernal, del calor recibido y acumulado durante el verano. Este criterio podría

ser utilizado en secado de granos, ya que este proceso se realiza durante un tiempo relativamente breve. Otro aspecto a tener en cuenta es el de formación de zonas de convección en el fondo y superficie, según se discutirá en la próxima sección, lo que disminuye la altura de aislación efectiva, necesitándose profundidades totales mayores.

### 3.-Estabilidad y mantenimiento del gradiente.

La obtención de un gradiente de densidades orientado desde el fondo a la superficie para todo el rango de temperaturas es una condición suficiente para la estabilidad. Existen modos posibles de convección (inestabilidades de la columna salina) cuya excitación se produce a menos que los gradientes de concentración y temperatura cumplan cierta relación en la que intervienen varias propiedades físicas de la solución. Esta fue obtenida por Weinberger (5) dentro del contexto específico de las pozas solares, habiendo sido discutida en detalle por distintos autores (10-13). De acuerdo a esta condición los gradientes salinos necesarios son bastante mayores que los requeridos por la simple condición de variación monótona de la densidad, por lo que habría que usar sales de alta solubilidad, tales como el  $MgCl_2$  o el  $KNO_3$ . Los estudios iniciales fueron efectivamente realizados con  $MgCl_2$  (2). No obstante el uso de porcentajes menores de sal abarata considerablemente los costos iniciales del sistema, por lo que se están estudiando pozas de  $NaCl$  y  $Na_2SO_4$ , con concentraciones máximas menores. Las experiencias de campo y laboratorio (4, 7, 1) han mostrado que es posible establecer y mantener el gradiente por períodos largos, formándose zonas convectivas de crecimiento muy lento. En el caso de la poza S se ha tenido períodos de trabajo ininterrumpido durante un año aproximadamente. Las zonas de convección tienden a formarse primordialmente en la superficie y el fondo, debido a las condiciones particulares de trabajo de la poza.

En el fondo el calentamiento fuerte que se produce del mismo modo debido a la absorción de la energía solar durante el día, inicia la convección, la que destruye el gradiente en una capa que pasa a tener temperatura y concentración constantes. Esta capa tiende a crecer lentamente con el tiempo, con una velocidad dependiente de varios factores (11). Las capas son

Facilmente detectables con los perfiles de temperatura, ya que en ellos aparecen como regiones de temperatura constante. Un ejemplo se muestra en la Fig.3 una capa que se ha dejado crecer en la poza S por dos meses. El gradiente puede ser reconstituido mediante la extracción, concentración y re-impresión adecuadas de la capa. La Fig.3 muestra el cambio de la capa en un ejemplo típico. Estas técnicas han sido objeto de muy poco estudio (4).

En la superficie, varios factores tales como la evaporación, ventilación por el viento y calentamiento de las paredes, pueden provocar la formación de otra capa, pudiéndose recuperar el gradiente como se ha indicado en el párrafo anterior. Varias soluciones se hallan en ensayo con el fin de evitar este problema: apantallamientos flotantes, capas de plástico transparente, plásticos blancos sobre las superficies laterales, pantallas de protección de éstas, etc., La experiencia acumulada en este campo es también de muy poca entidad como para evaluarla en forma definitiva. Se han utilizado tubos flotantes de plástico de 1" de diámetro, dispuestos como una cuadrilla de 3 m de lado, los que han sido efectivos en contrar la acción del viento (4). No obstante, la capa convectiva igual se formó debido a los otros factores. La experiencia acumulada con capas transparentes en la poza S se describe en la próxima sección.

Es necesario mantener el gradiente artificialmente debido a la difusión de sal. Se han propuesto (14) dos métodos conocidos con el nombre de método de tres y cuatro terminales, los que se ilustran en la Fig.4. El primero, en el que se introduce lentamente la solución en el fondo y se lava la superficie, logra una distribución salina de equilibrio con una dependencia exponencial de la profundidad que requiere cantidades considerables de sal. La otra solución requiere una cantidad más pero permite la extracción de la solución del fondo y su reconcentración con lo cual se obtiene una distribución lineal. Esto puede ser combinado eventualmente con el sistema de extracción, tal cual se ha hecho en la poza S, lo que se explica en una sección posterior.

La cantidad a agregar de sal estaría definida, en principio, por el coeficiente de difusión de la sal. Esta cantidad debe considerarse, sin embargo, como una cota mínima, ya que los distintos procesos de convección aumentan el transporte y reducen el agregado de sal para eliminar las capas. Hasta el

momento no se conocen evaluaciones de este mero, en forma detallada.

#### 4.- Limpieza de la solución y del fondo de la poza.

La limpieza de la solución es esencial ya que la radiación debe llegar al fondo. Existen varios factores que pueden provocar turbidez. En primer lugar, la sal industrial puede introducir impurezas. En nuestro caso ha dado lugar a la formación de compuestos de hierro del tipo gel, que no precipitan aunque se esperen tiempos largos. El tratamiento de la solución con sulfato de aluminio ha demostrado ser muy efectivo para producir la coagulación en tiempos menores a las 24 horas. En segundo lugar, se forman algas, especialmente durante el verano y en las capas superiores de baja salinidad. El tratamiento con sulfato de cobre dió excelentes resultados. En tercer lugar, el viento arrastra polvo e impurezas que caen al agua y se depositan en el fondo después de un tiempo. Este polvo, junto a restos de material coagulado provenientes del tratamiento ya descrito, se deposita en el fondo, el que adquiere un color marrón más bien claro. Con el fin de evaluar la posible disminución del coeficiente de absorción se han realizado medidas de reflexión en superficies cubiertas con distintos tipos de depósitos. Las capas de gel han resultado ser ligeramente difusoras y más reflectantes que el PVC negro del fondo, pero no de manera claramente significativa desde el punto de vista cuantitativo como para considerarla un problema primordial en el rendimiento de la poza. En ambos casos, en la zona de reflexión especular se obtienen valores del orden del 10% de la reflexión por un espejo. Por comparación es interesante destacar que en el caso de lábra de vidrio pintada de negro, la absorción es total dentro de los límites de sensibilidad empleados.

Debe destacarse que el problema de la suciedad en el fondo de la poza puede presentar características muy particulares de acuerdo con el lugar. Por ejemplo, Nielsen ha tenido problemas de contaminación con hojas (4) que tñen el agua de un color oscuro. En la poza S se han ensayado varias cubiertas transparentes para evitar la suciedad en el fondo, así como los problemas superficiales producidos por el viento y la evaporación. Se han probado capas de PVC y polietileno.

La primera no ha dado resultado debido al blanqueo del plástico por la inclusión de agua dentro de la capa. La segunda se ha comportado mejor, observándose que la pequeña capa de agua que se deja por encima la protege eficazmente de la radiación ultravioleta, además de impedir que se sacuda con el viento. Este plástico terminó por romperse en los bordes, donde el tipo de sujeción utilizado lo exponía a la radiación directa. No es sencillo mantener el plástico sumergido a una distancia constante de la superficie, dado que tiende a flotar debido a su densidad, debiéndose prestar atención a este punto, especialmente cuando han de cubrirse superficies grandes. El plástico resulta efectivo en su misión de evitar la contaminación del fondo de la poza, aunque plantea el problema de su propia limpieza. Se ha constatado que ello se puede realizar efectivamente mediante un cepillo que pasa sobre el plástico y aspira agua al mismo tiempo que el polvo. Los ensayos, tanto en el fondo como en la superficie muestran que el gasto de agua no excede de 10 lts por metro cuadrado de superficie. La utilidad de la capa dependerá de las condiciones particulares de cada caso. Si el polvo es abundante y no altera básicamente la absorción en el fondo, la capa no es beneficiosa, ya que exige su limpieza continua. Por otro lado, debe indicarse que la capa puede ser beneficiosa si el efecto del viento y evaporación son importantes.

#### 3.- Extracción de calor.

El método más obvio para la extracción de calor consiste en la colocación de cañerías en el fondo de la poza. No se han encontrado hasta el momento estudios sobre la distancia a la que es necesario colocarlos y el efecto que tendrán sobre la capa convectiva inferior, aunque se han anunciado la realización de investigaciones al respecto (4).

Una alternativa de costo muy bajo consiste en extraer la capa convectiva inferior, la que se encuentra a alta temperatura. Se han realizado estudios que muestran la factibilidad de realizar este proceso sin alterar el gradiente (15), siem-

pre que se cumplan las condiciones que establecen la velocidad máxima de extracción. Las distancias entre las bocas de extracción e inyección pueden ser grandes. En la poza 5 se acaba de instalar un sistema de este tipo, tal cual se muestra en la Fig.5. Dos cañerías perforadas a intervalos iguales se colocaron a lo largo de cada uno de los lados y permiten la extracción e inyección. El diámetro de los orificios permite obtener un flujo parejo de solución. Esta es extraída, pasa por un intercambiador que la enfría, un decantador, un filtro y retorna a la poza. El decantador y el filtro permiten la limpieza de la solución. Parte de ella puede ser derivada hacia un tanque con sal donde se enriquece, permitiendo mantener eventualmente el gradiente de la poza. Las cañerías son de plástico y los tanques de fibrocemento. El sistema completo se encuentra en ensayo. Este tipo de extracción provoca un gradiente de temperatura horizontal que puede influir en la estabilidad del sistema por lo que se analizará en detalle las distribuciones de temperatura y densidad en toda la poza durante el período de extracción.

#### 6.-Aspectos constructivos y económicos.

Con el fin de realizar una primera evaluación de las posibilidades económicas de este tipo de colector, se describirá en continuación una técnica de construcción para pozas grandes y se discutirán los costos.

Dado que no existen problemas críticos de nivelación y no se necesita aislación térmica, la poza puede construirse extendiendo el plástico sobre la superficie que se ha nivelado y en la que se han levantado terraplenes de tierra hasta la altura necesaria. Si el tipo de superficie pone en peligro el plástico podría necesitarse una capa fina de arena. En algún caso (2) se ha constatado la formación de gases por debajo del plástico, originados en una producción bacteriana estimulada por el aumento de temperatura. Si las condiciones del terreno dan lugar a este tipo de problema, habrá que instalar caños perforados para permitir la salida de gas.

La solución exige unos 100 kg de sal por metro cuadrado y la instalación de tanques de saturación y coagulación, así como la bomba de circulación y las cañerías de extracción e inyección.



Finalmente podría necesitarse, de acuerdo a lo ya discutido, la colocación de alguna capa extra de plástico y barreras contra el viento.

La instalación experimental de este tipo en los EEUU (4) con 100 m<sup>2</sup> de superficie, ha costado del orden de U\$S 40 por metro cuadrado. Estimaciones con materiales nacionales, con plásticos y sales de menor calidad, dan valores del orden de U\$S 15 por metro cuadrado. Dentro de este costo, los cuatro componentes principales son: plástico, sal, instalaciones mecánicas y preparación de solución y mano de obra, con incidencias que tienen el mismo orden de valor.

El precio internacional de colectoras de tipo metálico es del orden de U\$S 120 por metro cuadrado, siendo el precio en el país un poco mayor.

La estimación del rubro mantenimiento es aún muy difícil de realizar, ya que debe definirse mejor el grado de automatización de los equipos auxiliares. Debe acotarse que el costo de reposición no es alto.

## REFERENCIAS

- 1.- Saravia, L.R., Bruné, L.A., Bekerman, C.- Experimentos en una poza solar- 2ª Reunión de Trabajo de Energía Solar Salta (R.Argentina)-Julio 1976.
- 2.- Tabor, H.-Large area solar collector for power production-Solar Energy, Vol.7, N°4, p.189,1963.
- 3.- Jain, G.C.-Heating solar pond-EH61.1
- 4.- Nielsen, C.E.-Experience with a prototype solar pond for space heating-ISES "Sharing the sun"- Winnipeg, 1976.
- 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, Vol.17, N°1,1975.
- 7.- Saulnier, B., Chepurmy, N., Savage, S.B., Lavand, T.- Field testing of a solar pond- ISES "Solar Use-Nov-A Resource for People"-Los Angeles, Julio 1975.
- 8.- Eliseev, V. et al.- Investigación teórica del régimen térmico de una piscina solar salina-Heliotechnology, Vol. 1, N°1, p.45, 1971.
- 9.- Bruné, L., Saravia, L., Bekerman, C.-Modelo de laboratorio de una poza solar-Actas-2a Reunión de Trabajo de Energía Solar-Salta(R.Argentina)-Julio 1976
- 10.-Leshuk, J.P., Zaworski, R.J., Styris, D.L., Harling, O.E.- ISES "Sharing the sun"-Winnipeg-1976.
- 11.-Nielsen, C.E., Rabl, A.-Salt requirements and stability of solar ponds- ISES "Sharing the sun"-Winnipeg-1976.
- 12.-Turner, J.S.-Buoyancy effects in fluids-Cambridge University Press, 1973.

- 1- Rappert, H. E., Moore, D.R.- Non-Linear double-diffusion convection- J- Fluid Mech., vol 74, part 4, p.821, 1976.
- 2- Nielsen, C. E., Rabl, A., watson, J., weiler, P. Maintenance of Salt Concentration Gradient in Solar Ponds- ISES Conference, Los Angeles, 1975.
- 3- Daniels, D.G., Merriam, M. F.- Fluid Dynamics of Selective withdrawal in solar ponds. ISES Conference, Los Angeles, 1975.

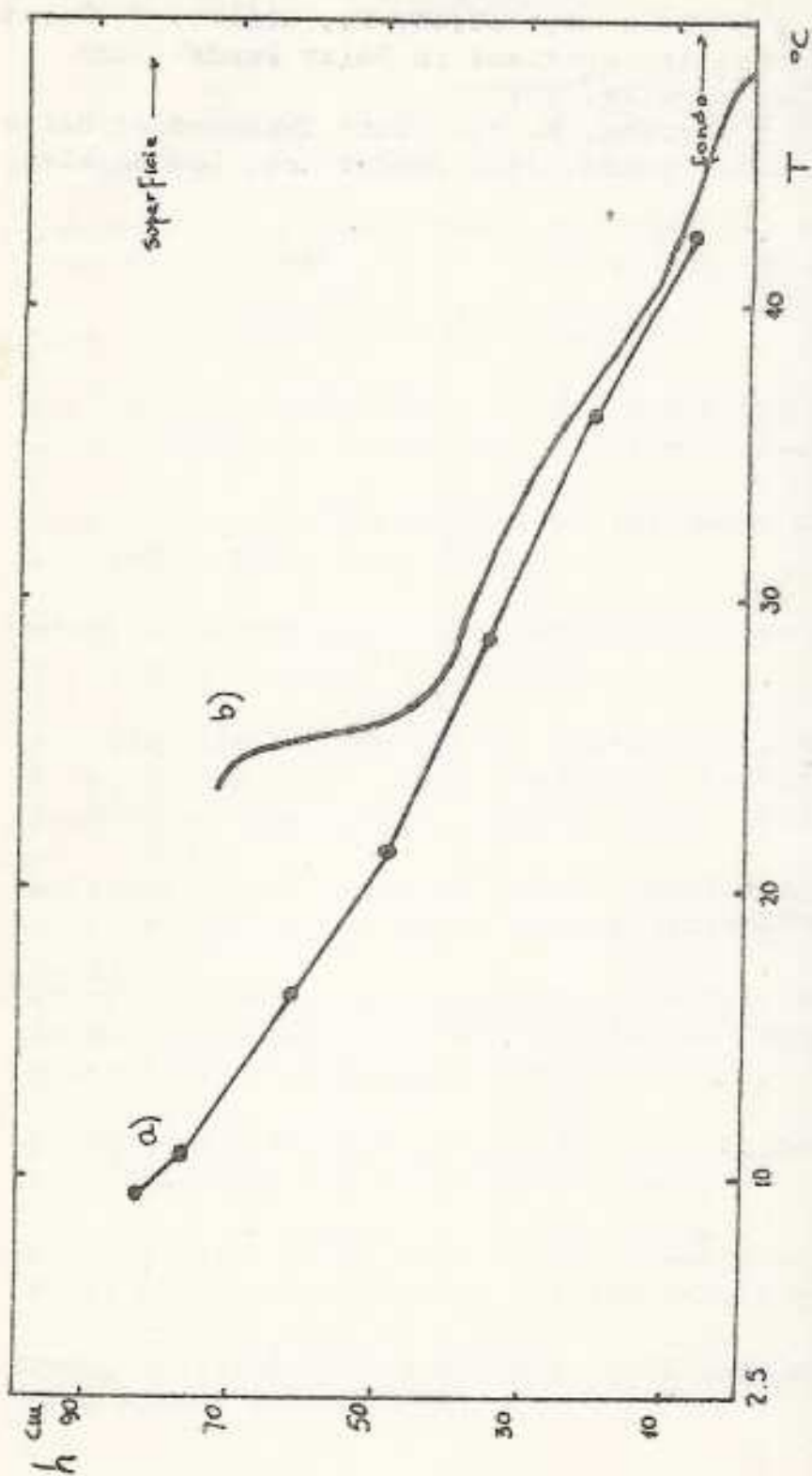


Fig. 1  
 Perfiles de temperatura según la altura sobre el fondo de la poza B  
 a) medidas en puntos fijos  
 b) registro continuo

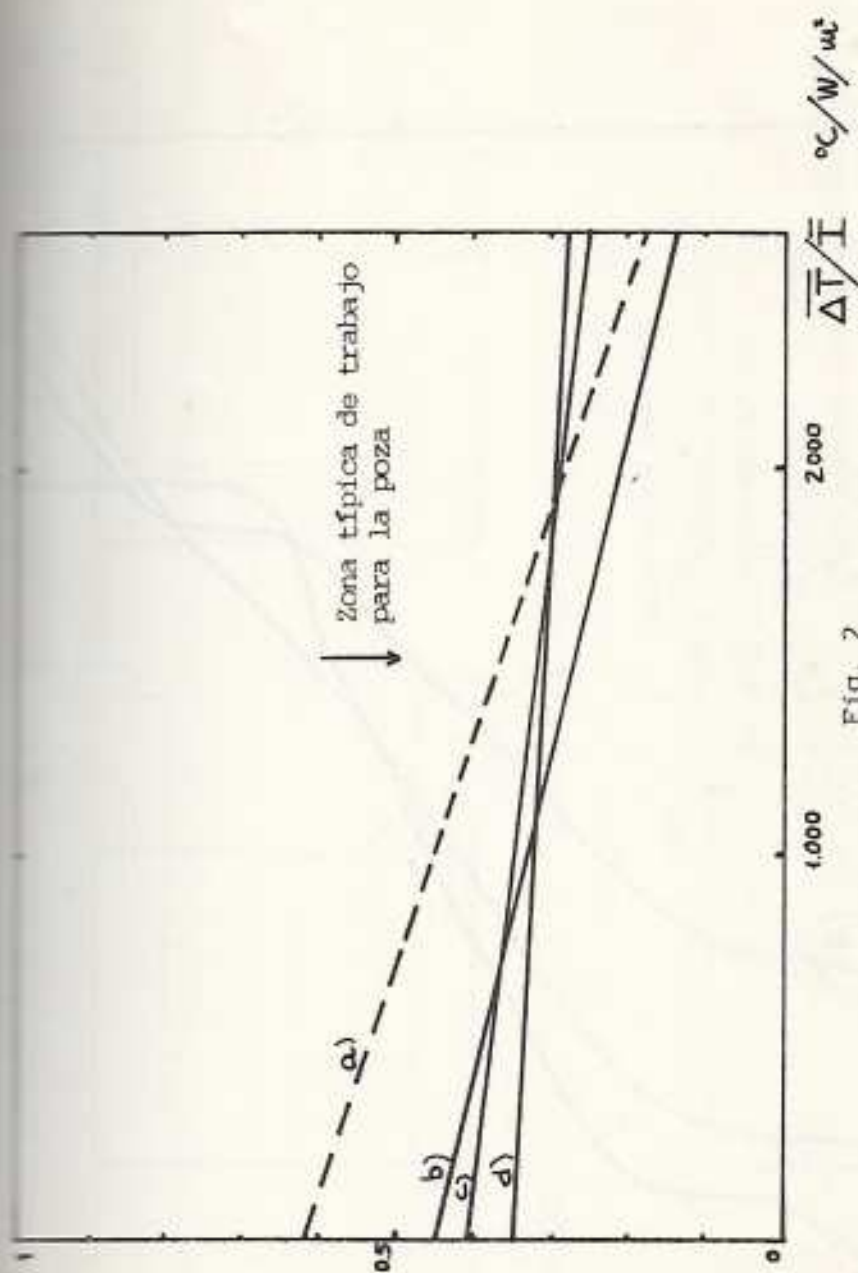
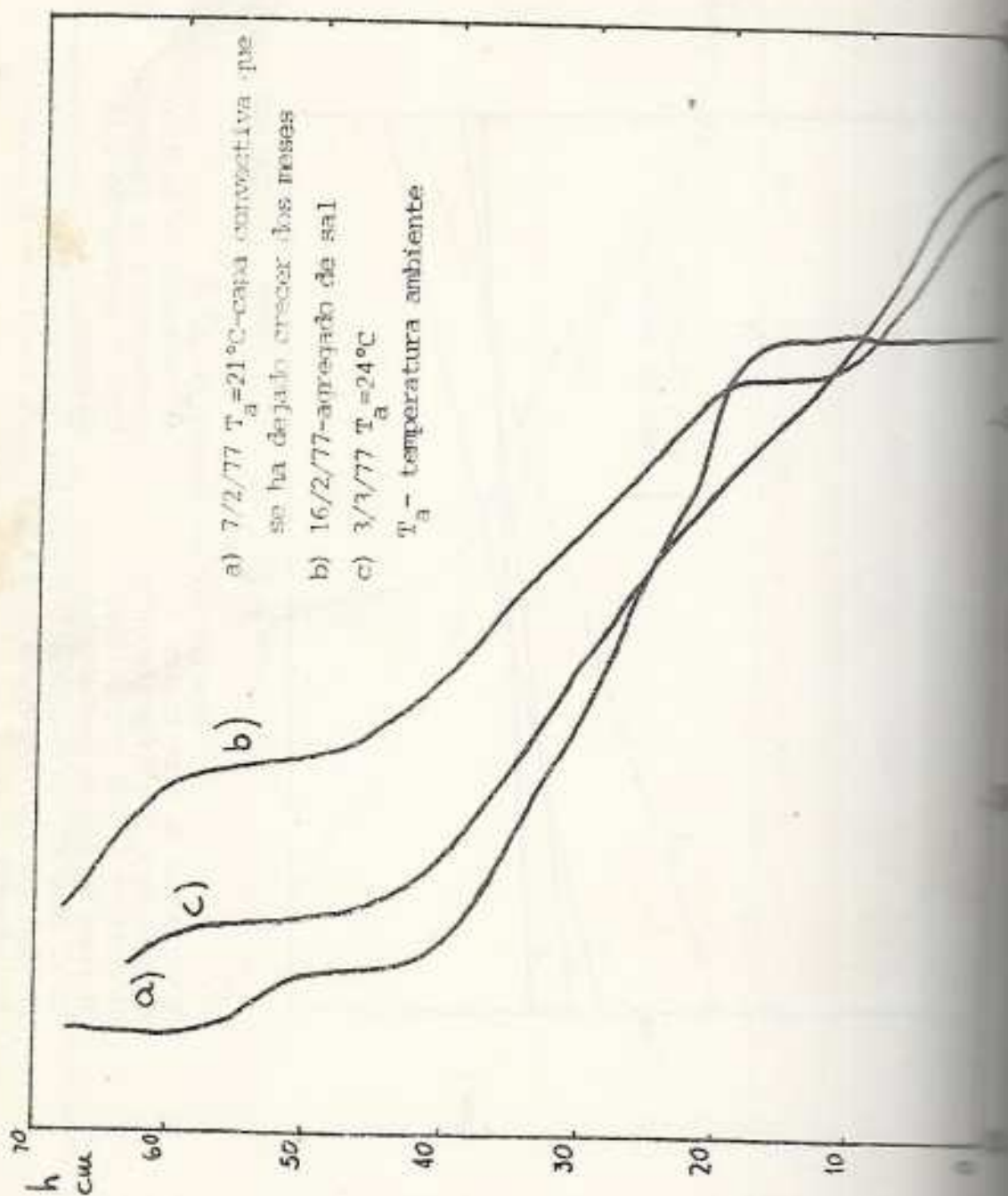


Fig. 2

Rendimiento en función de  $\overline{\Delta T}/\bar{I}$

- a) colector de aire típico
- b) poza de 0.5 m de profundidad
- c) poza de 1 m de profundidad
- d) poza de 2 m de profundidad

En el caso a), en que habitualmente los rendimientos se calculan con los valores instantáneos de  $\Delta T/\bar{I}$ , se ha realizado un promedio adecuado.



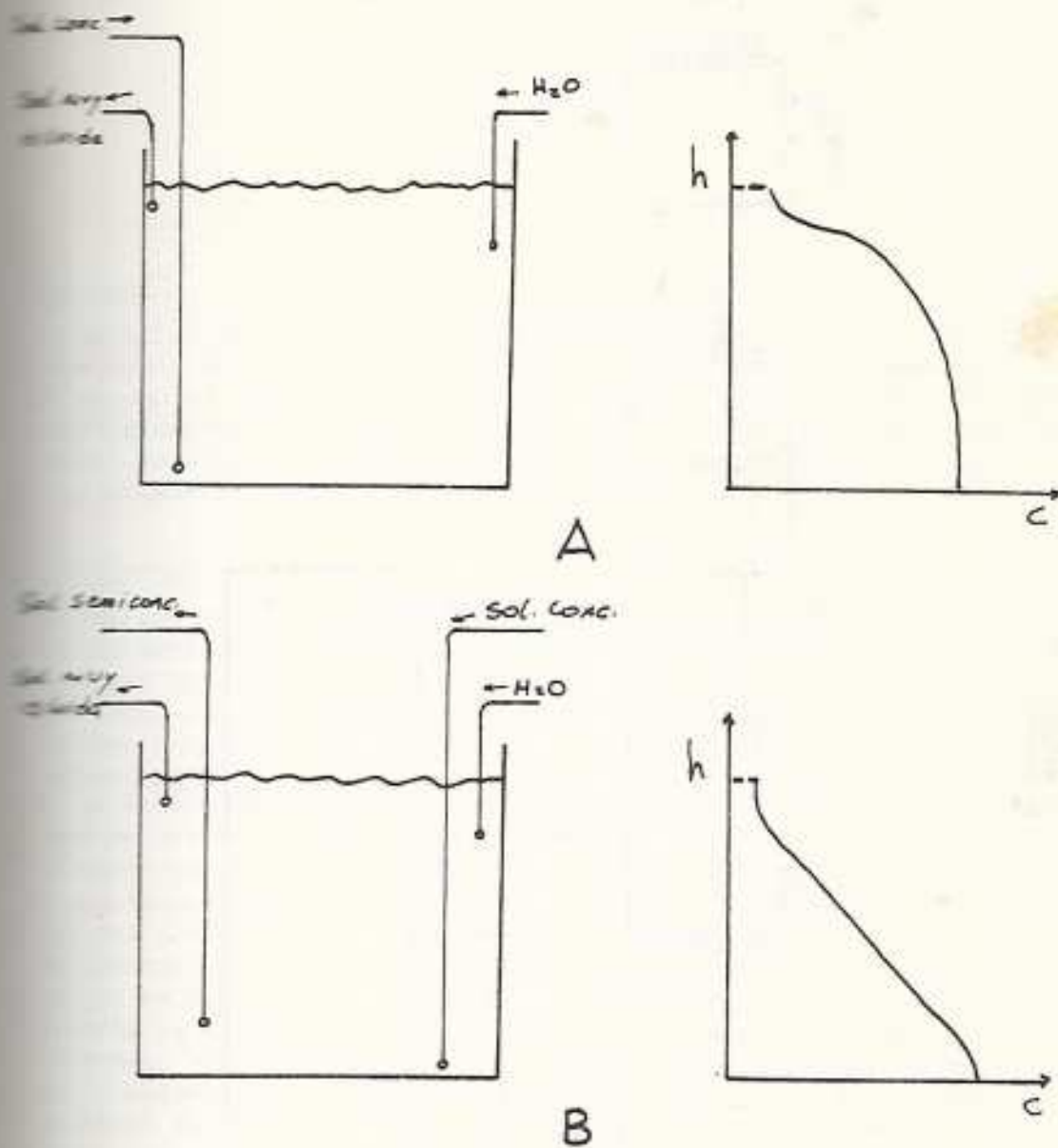


Fig. 4  
 Sistema de mantenimiento del gradiente  
 A) método de 3 terminales  
 B) método de cuatro terminales

