

POZA DE CLORURO DE SODIO: DISEÑO, CONSTRUCCION  
Y ENSAYOS PRELIMINARES

A. Iriarte, S. Biagi, R. Moreno, J. Sequi y A. Amaya

INENCO", Unidad de Investigación Catamarca

Facultad de Ciencias Agrarias-UNCa.

C.C. 189-4700 Catamarca

G. Lesino y L. Saravia

INENCO", Universidad Nacional de Salta

Bs. As. 177-4400 Salta

Resumen

La poza solar, sistema de colección y acumulación simultánea de energía térmica es una de las posibles soluciones que se están estudiando a efectos de aumentar / la rentabilidad de la energía solar en / las aplicaciones agrícolas a nivel industrial.

En el presente trabajo se describe el proceso constructivo de una poza solar de / cloruro de sodio de 400 m<sup>2</sup> realizada en / la Universidad Nacional de Catamarca para uso en conexión con el secado de productos agrícolas.

Se analiza el diseño y configuración de / la misma, mediante modelos matemáticos / (3,4), teniendo en cuenta las características de la zona donde se construye, así como el uso a que se destinará la energía térmica extraída. Asimismo se muestran los resultados obtenidos en un ensayo preliminar de operación y se explican los diferentes comportamientos de la misma.

1.- Introducción

El empleo de colectores solares tradicionales, para la provisión de energía térmica, se ve limitado cuando se proyecta / su utilización a grandes instalaciones / industriales con exigencias importantes / en el suministro de calor. Los principales problemas se deben a la necesidad de:

- Implementar acumuladores adicionales de gran volumen, a fin de cubrir la intermitencia de la radiación solar.
- Realizar el mantenimiento de la superficie de colección evitando la influencia negativa de la suciedad depositada /

- (\*) Instituto UNSa-CUNICET  
( ) Unidad de Investigación del INENCO en Catamarca  
UNCa-UNSa-CUNICET

sobre la cubierta de los mismos.  
c.- Transportar la energía colectada a / distancias considerables, a efectos de / concentrar en el acumulador para su posterior utilización, fundamentalmente / cuando se trata de instalaciones con extensas superficies de colección. En ese / sentido, trabajos realizados (1) para / determinar la factibilidad de uso de colectores solares con aire como fluido / caloportador, para el secado de productos agrícolas, muestran la necesidad de profundizar los estudios sobre sistemas de colección que permitan abaratar costos de instalación, posibilitar el uso / del sistema en forma intensiva a lo largo del año y transportar la energía a / los puntos de utilización con facilidad y costos razonables.

La alternativa que se propone para solucionar satisfactoriamente los problemas planteados es la utilización de pozas / solares, que permiten la acumulación / de energía térmica sin costo adicional. Este tipo de sistema resulta particularmente atractivo, si se tiene en cuenta / que las componentes del mismo son de productos abundantes, como el agua y la sal. Es importante destacar que las características del sistema de colección permiten adecuarlo según el uso a que / se destine la energía y consecuentemente controlar la temperatura de acumulación sin cambios importantes en su configuración.

Al respecto, se ha iniciado un proyecto con el asesoramiento del INENCO, destinado a proveer energía para un secado de productos agrícolas y complementar su uso invernal con la calefacción de locales de cría, invernáculos, etc., usando para colección-acumulación un sistema tipo POZA SOLAR, como

una forma de lograr costos razonables para la inversión en procesos agrícolas regionales con energía no convencional.

Este proyecto iniciado hace unos años, se ha visto demorado como consecuencia de la necesidad de desarrollar una tecnología, que aporte soluciones a una de las desventajas que trae aparejado el uso de solución salina en las pozas solares, esto es, la utilización de intercambiadores de calor agua-aire que sean inalterables al contacto con la solución. En ese sentido, se ha logrado desarrollar un intercambiador de superficie plástica, (polietileno), que permite el intercambio de calor entre la solución y el aire que circula a través del producto a secar, sin registrar problemas de corrosión y que resulta de muy bajo costo (2), situación que permite realizar la construcción del secadero al mismo valor económico que los tradicionales para secado solar.

solucionado el problema de la conversión a bajo costo, se ha iniciado el proceso de ensayos preliminares para la formación del gradiente salino y se realizan estudios tendientes a resolver algunos problemas que ocasionan inestabilidades y disminuyen el rendimiento de la poza como son los vientos constantes en la primavera (20km/h), abundante polvo y materia orgánica, característicos de nuestra zona.

## 2.- Aspectos Generales

La poza solar es una masa de agua salobre que combina la colección de energía solar con la acumulación térmica en el mismo recinto físico. Consiste generalmente, en un contenedor con agua donde se diferencian tres zonas. (Fig.1): Conectiva inferior (ZCI), no convectiva o de gradiente (ZNC) y la convectiva superior o superficial, normalmente se origina naturalmente por la acción del viento y el calentamiento diurno, pero en casos especiales puede formarse mediante la introducción de agua natural. Su espesor es conveniente mantenerlo entre 20-40 cm, tan pequeño como sea posible, evitando que se concentre por la difusión salina de las otras zonas. Esta capa tiene gran importancia por que la radiación infrarroja se absorbe en los primeros centímetros de agua, dependiendo la eficiencia de la poza del espesor de la misma.

La zona convectiva o capa de gradiente salino actúa como aislación de la poza, pero con características diferentes a las aislaciones convencionales de gra-

diente de temperatura uniforme, ya que la radiación que absorbe contribuye a la formación de un gradiente de temperatura no uniforme. Definido el espesor de la capa ZCS, el espesor de ZNC es un compromiso entre el aumento de la aislación térmica y la disminución de la radiación solar que llega al fondo de la poza.

La zona convectiva inferior es la que almacena la energía térmica y su espesor depende del tipo de uso a que se destina, así como del mecanismo que se use para la extracción del calor de la solución caliente.

Es importante destacar que existen pozas solares donde el intercambio no se realiza mediante la extracción de solución y consecuentemente no necesitan de la zona convectiva mencionada; es el caso cuando se la usa como elemento concentrador de sales.

Además de tener en cuenta el uso futuro de la poza, es necesario, para su diseño, realizar un estudio cuidadoso de las condiciones de estabilidad para minimizar el requerimiento de sal y a la vez utilizar la sal disponible en la región. Es conveniente la utilización de sales cuya solubilidad aumenta rápidamente con la temperatura para evitar la difusión, uno de los problemas más complicados que presenta una poza en operación.

En la Fig. 2 se puede observar que las sales más indicadas serían las de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . A pesar que el  $\text{NaCl}$  presenta una concentración de saturación aproximadamente independiente de la temperatura, la mayoría de las pozas solares, y en particular la que se describe en el presente trabajo, utilizan esta sal debido a su menor costo y mayor disponibilidad.

## 3.- Aspectos Constructivos

El contenedor es una excavación de aproximadamente  $400\text{m}^2$  de superficie colectora, 3m de profundidad con paredes laterales en forma de taludes, con pendiente de 30°. Los mismos han sido compactados con tierra húmeda, resultando una superficie suave que asegura un buen soporte para el material usado como impermeabilizante.

La geometría que más se adecua a la configuración del contenedor es la de un trapecio truncado con su base menor hacia arriba. En esta base, en el eje central Este-Oeste (Fig.3) se han instalado termocuplas para evaluar la distribución de temperatura hasta 2m de profundidad del suelo. Asimismo sobre la superficie de la base del receptáculo se ha colocado un reticulado de alambre galvanizado dispuesto adecuadamente.

mente, a los efectos de permitir la medición de conductividades eléctricas y detectar posibles fugas de solución. Como elemento de nivelación y con el fin de evitar el contacto del impermeabilizante con el suelo rugoso se ha colocado 0,30m de arena fina en la base tapando el sistema de detección de pérdidas, para lograr mayor eficiencia del mismo.

La excavación es cubierta por tres mantas superpuestas de polietileno negro de 250 micrones, para lograr la impermeabilidad necesaria.

#### 4.- Análisis de Diseño

La configuración de la poza, su utilización como fuente de energía térmica en el secado de productos agrícolas, consiste en:

- a.- Capa convectiva superior (ZCS), de bajo contenido salino formada con agua corriente, de 0,30m de espesor.
- b.- Capa de gradiente salino (ZNC), con concentración creciente hasta un 18%, de 1,20m de espesor.
- c.- Capa convectiva inferior (ZCI), con solución salina al 18% de 0,60m de espesor.

Con el fin de predecir y evaluar el comportamiento del diseño, teniendo en cuenta que el calor será suministrado al secadero mediante la extracción de la solución salina de la zona convectiva de acumulación (ZCI) se usan dos modelos matemáticos simulados por computadora (3,4).

Una de las alternativas propuestas (3), / para evaluar el rendimiento térmico, es considerar a la poza como un colector solar plano y un acumulador térmico en forma independiente. Esto es posible debido a que la masa térmica del sistema de acumulación es grande y sus variaciones en temperatura son pequeñas con el aporte diario de radiación y la fluctuación de la temperatura ambiente.

En el balance térmico se debe tener en cuenta el aporte solar que es acumulado / en la ZCI y las pérdidas de energía por las paredes y suelo de la poza hacia la tierra, la difusión térmica hacia arriba a través de la ZNC y el calor extraído / como energía útil. Es conveniente al igual que en el caso de colectores planos, no considerar en esta etapa las pérdidas hacia la tierra y suponer un estado estacionario.

Si consideramos:

- X1: Profundidad del límite entre ZCS-ZNC, es decir el espesor de ZCS.
- X2: Profundidad hasta el límite entre / ZNC-ZCI.

X3: Profundidad total de la poza.  
(En todos los casos la medición se realiza desde la superficie de la misma).

La distribución vertical de temperatura  $T(x)$ , puede calcularse mediante el siguiente balance térmico en estado estacionario en una dimensión:

$$Kd^2T(x)/dx^2 = H dh(x)/dx \quad (1)$$

K: Conductividad térmica del agua ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )

H: Radiación solar sobre superficie horizontal ( $\text{W/m}^2$ )

$h(x)$ : Fracción de energía que llega a profundidad  $(x)$ .

El flujo de calor (3) en la ZCI se puede obtener por la relación:

$$q = Hh(x) - KdT/dx \quad (2)$$

La fracción  $h(x)$  es una función de la profundidad, disminuyendo rápidamente a pocos centímetros de la superficie como consecuencia de la absorción del infrarrojo.

De la ecuación (2) se obtiene:

$$q = f(x)H / (X_2 - X_1) - K(T(X_2) - T(X_1)) / (X_2 - X_1) \quad (3)$$

$$\text{donde } f(x) = \int_{X_1}^{X_2} h(x) dx$$

$T(X_1)$ : Temperatura de la ZCS, igual a la temperatura ambiente.

$T(X_2)$ : Temperatura de la ZCI.

La ec.(3), puede escribirse como:

$$q = (at)H - UL(T(X_2) - T(X_1)) \quad (4)$$

Esta ecuación (Kooi 1979) tiene la misma estructura que la de Hattel-Whiller dios y permite determinar la eficiencia de la poza en estado estacionario al igual que para colectores planos.

Operando se obtiene:

$$q = Fr((at)H - UL(T(x_2) - T(x_1))) \quad (5)$$

at: Producto absorbcancia-transmitancia.

UL: Factor de pérdida =  $K/(X_2 - X_1)$ .

FR: Factor de remoción =  $G/Cp(1 - \exp(-UL/GCp))$

G:  $m/UL$

UL: Área de la poza.

La relación funcional de la fracción de energía absorbida puede ser obtenida mediante información experimental (4) y corregida de acuerdo al ángulo de incidencia, / siendo en general:

$$H(x) = a - b \cdot \ln(x) \quad (6) \text{ donde } a \text{ y } b \text{ son constantes experimentales.}$$

En el caso que nos ocupa se ha procesado esta ecuación para diferentes profundidades con  $a=0,36$  y  $b=0,08$ . Con los datos / obtenidos se puede calcular de la ec.(3) la variación de la eficiencia como una / función de los valores  $T/H$  suponiendo / que  $X_1=0,3$ ;  $X_2=1,5$ ;  $K=0,64 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ;  $H= / 200 \text{ W/m}^2$ , fig. 4, donde se incluye también la correspondiente a colectores planos /

con cubierta simple y doble como elemento de comparación. Se observa que para valores bajos de  $\Delta T/H$ , particularmente menores que 0,15, la eficiencia de los colectores planos es mucho mayor que la correspondiente a la poza diseñada, explicable por la disminución rápida del producto  $(at)$  a pocos centímetros de la superficie. Sin embargo, para valores mayores que 0,15 la poza es más eficiente debido a que los factores que contribuyen a las pérdidas en los colectores planos, como pérdidas por radiación y conductividad térmica no están presentes en la poza. Para  $\Delta T/H=0,2$  situación de diseño, la eficiencia es aproximadamente un 27%.

Asimismo, si se realiza un estudio para diferentes espesores de capas convectiva superior, fig.5 y X2 en situación de diseño, se advierte lo enunciado precedentemente, en el sentido de que el espesor de la ZCS y de la ZNC regula fuertemente la eficiencia del sistema para valores  $\Delta T/H$  mayores que 0,2. En ese sentido, se puede observar en la fig. 6 que para valores de X2 bajo la eficiencia del sistema aumenta y consecuentemente la relación  $\Delta T/H$  disminuye, lo que implica, para radiación constante, una disminución en la temperatura de solución a extraer. Esta situación de compromiso debe resolverse en términos de un balance adecuado entre el espesor de la aislación térmica, la fracción de energía que llega a la ZCI y las necesidades térmicas del uso a que se va a destinar la poza. En esta gráfica se muestra la situación predicha por el modelo para nuestro caso particular de un X2=1,5m.

Cabe destacar que se ha tomado X1=0,3m en consideración a los fuertes vientos de la zona, con el fin de disminuir las posibilidades de erosión de la capa de gradiente por la formación de olas. Simultáneamente, está prevista la inclusión de rompe olas del tipo flotadores, que serán discutidos más adelante, para atenuar la generación de movimientos en la superficie de agua.

En la fig. 7 se muestra los resultados del modelo para la distribución de temperatura en la ZNC, para diferentes temperaturas de la ZCI como función de  $\Delta T/H$ . Asimismo se observa la distribución en la zona de gradiente para la situación del diseño.

El balance energético para estado estacionario, con una velocidad de extracción de calor (4)  $U=nH$ , se puede plantear también de la siguiente manera:

$$h(x) = K \frac{dT(x)}{dx} - U = 0 \quad (7)$$

Con la resolución (4) de esta ecuación se obtiene:

$$T(x) = T_a + (\beta(x)H - (x-x_1)U)/n \quad (8)$$

U: Velocidad de extracción

n: Eficiencia

$$f(x) = \int_{x_1}^x h(x') dx' \quad (\text{expresión referencia (4)}) \quad (9)$$

Si el flujo de calor es sacado de un nivel  $X_w$  a una temperatura  $T_w$ , con la ec. (8) se puede obtener información de la variación del incremento de temperatura con la profundidad de extracción, para diferentes eficiencias (fig.8)

Se observa que con este modelo, para un incremento de 40°C y una extracción a una profundidad de 1,5m se obtiene una eficiencia en el orden de 31,6%, algunos puntos más altos que con el modelo estacionario de colectores planos.

## 5.- Ensayo Preliminar

La configuración prevista en esta etapa fue diseñada a efectos de realizar un ensayo que permitiera evaluar la técnica de llenado, la formación de gradiente y el comportamiento de sistemas auxiliares tales como rompe olas, extracción de muestras de solución y medición del gradiente de temperatura. En ese sentido el principal problema que se presenta en nuestra zona es la alta velocidad del viento fundamentalmente en las horas diurnas, que atentan contra la capa de gradiente. Se ha desarrollado un sistema de bajo costo y fácil fabricación, que consiste en un tubo achatado de polietileno reforzado contra U.V. de 3,5x0,08x0,03m de largo, ancho y alto respectivamente. En su interior se ha colocado arena y poliestireno expandido en proporciones adecuadas para que flote con 5cm de su altura sumergida en agua con una concentración salina del 1%. Estos se colocan en la superficie del agua, conformando una red de triángulos equiláteros unidos en sus vértices y tensados en algunos puntos desde el exterior para evitar que se deformen.

El control del gradiente salino se realiza mediante la extracción de la muestra por un sistema de vacío y su medición y corrección se efectúa en laboratorio por medio de densímetros.

La temperatura se mide con termocupias de cobre-constantán y con termómetros digitales a diodo, que están instalados en el dispositivo que extrae la muestra.

El llenado se realizó mediante la inyección de agua a través de un difusor formado por dos planchuelas semicirculares separadas por 3mm. Entre ellas circula el agua fresca que diluye a la solución que se encuentra sobre el nivel del mismo.

El proceso de llenado consiste en ubicar el difusor en la profundidad donde comienza la capa de gradiente e introducir agua hasta que la altura de la superficie libre del agua ascienda 1cm, en ese instante se sube el difusor 2cm y se repite la inyección. Este proceso se continúa / hasta que el difusor llega hasta la superficie, lográndose capas de 2cm con densidad decreciente.

En la fig. 9 se muestra el perfil de salinidad, gravedad específica en función de la profundidad, al finalizar la formación de la capa de gradiente.

Cabe destacar que las primeras cuatro capas se formaron con el aporte de agua suministrada por una bomba a razón de 5100 l/h, con una velocidad de salida del difusor de aproximadamente 0,7m/seg., formando capas de un espesor de 2cm. Las capas restantes fueron armadas mediante agua de la red domiciliaria a un caudal / de 1.500l/h.

Esta variación de velocidad de salida del agua, diferentes espesores de capa, así / como la contribución producto de las lluvias durante el llenado, ha producido un cambio de la pendiente del perfil y dos mesetas. Cabe destacar que el viento también contribuyó debido a que el sistema para controlar la erosión fue instalado / luego de concluida la etapa de formación del gradiente.

De todas maneras, lo importante es que, a pesar de estas irregularidades, el gradiente tiende a recomponerse disminuyendo las mesetas, (fig.9). En caso de no suceder ese reajuste se lo puede realizar en forma artificial.

En la fig.10 se muestra los perfiles de temperatura para diferentes días, notándose un incremento rápido de la temperatura para los primeros siete días. Esto / se justifica al no disponer de un espesor razonable de capa superior, lo que aumenta la eficiencia de colección sumado a que / la radiación sobre superficie horizontal llega a valores de 27MJ/m<sup>2</sup>-día. Es de notar que durante este ensayo no se realizó extracción de calor de la poza.

En la fig.11 se muestra la variación de /

temperatura en zona convectiva inferior, así como la cantidad de calor acumulada en función del tiempo.

El rendimiento promedio obtenido para la época de mayor acumulación está en el orden del 10%, en razón que el sistema tiene poca aislación y ha iniciado un proceso de destrucción de las capas del gradiente. Es importante destacar que durante el tiempo de funcionamiento de la poza hubo un considerable aporte de precipitación pluvial que aumentó el espesor de la capa superior.

En la fig.12, se comparan los perfiles de temperatura para algunos días de operación con los resultados del modelo (3) / notándose concordancia entre ellos a medida que la poza recompone su gradiente de densidad.

## 6.- Conclusiones

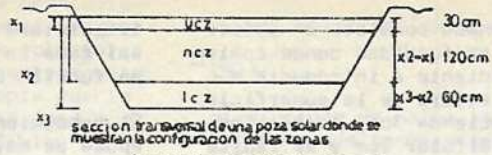
Del análisis de los datos obtenidos de la simulación matemática de los modelos desarrollados y comprobados experimentalmente por Kooi (1979) y Nielsen (1980), se desprende un comportamiento aceptable del / mismo para nuestro diseño.

Los ensayos preliminares sugieren:

- a.- Prever una fuente de agua para llenado que suministre un caudal constante.
- b.- Iniciar el llenado con el sistema de rompe olas instalado.
- c.- Concluir el llenado formando la capa superior con un espesor adecuado.
- d.- Evitar la formación de mesetas durante el llenado.
- e.- Extraer el calor previsto.

## 7.- Referencias

- (1) A.Iriarte, E.S.de Juenader, S.B. de / Biagi. "Estudio de prefactibilidad de un secadero solar de uva". Actas VI Reunión de ASADES, Catamarca, 1980.
- (2) A.Iriarte, S.de Biagi, E.S.de Juenader "Intercambiadores de calor con superficie plástica para secado solar". Actas VIII. Reunión de ASADES, La Pampa 1983.
- (3) C.F.Kooi "The steady state salt gradient Solar Pond". Solar Energy vol.23 / 1979
- (4) C.E.Nielsen "Non convective salt gradient Solar Pond". Energy Technology Handbook (1980)



sección transversal de una poza solar donde se muestran la configuración de las zonas

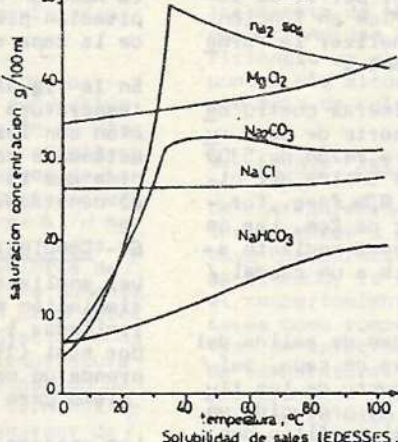
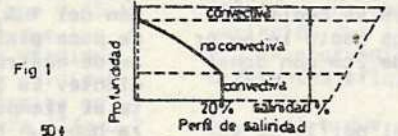


Fig 2

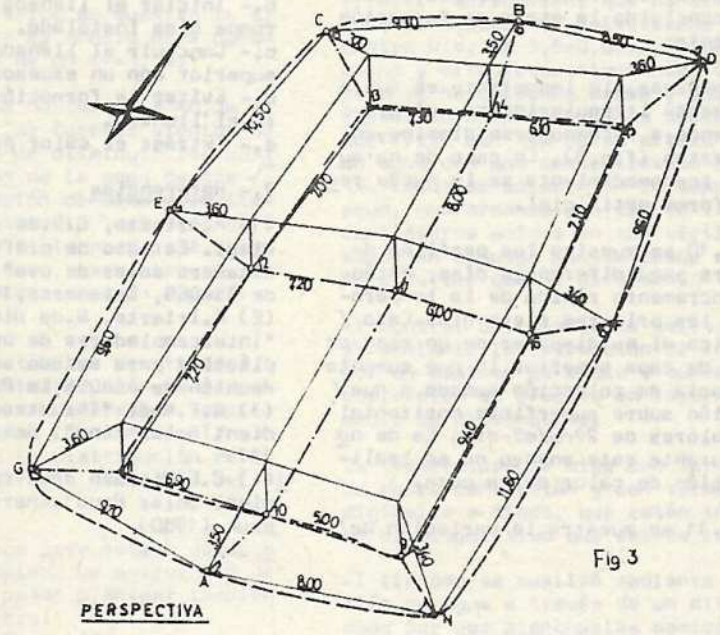
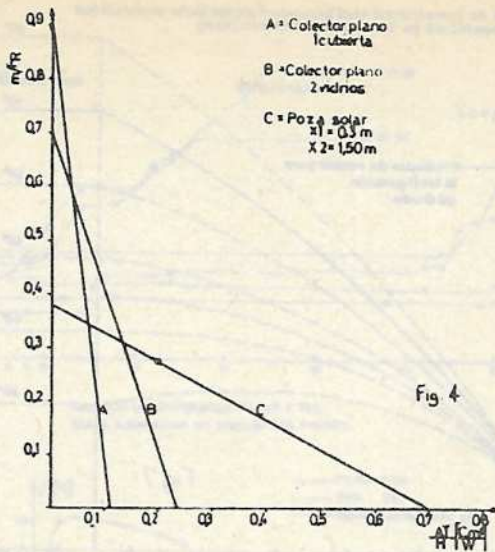
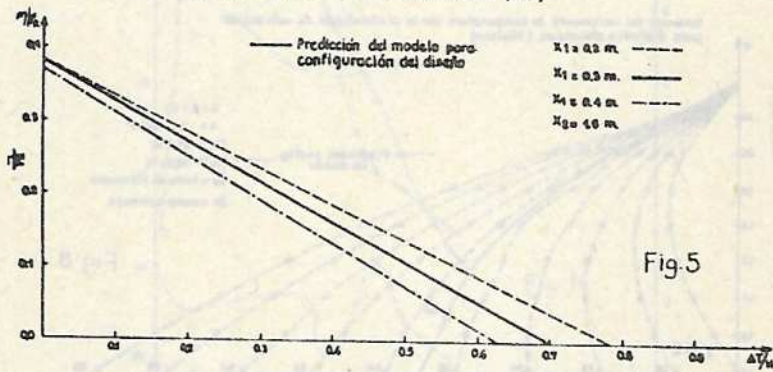


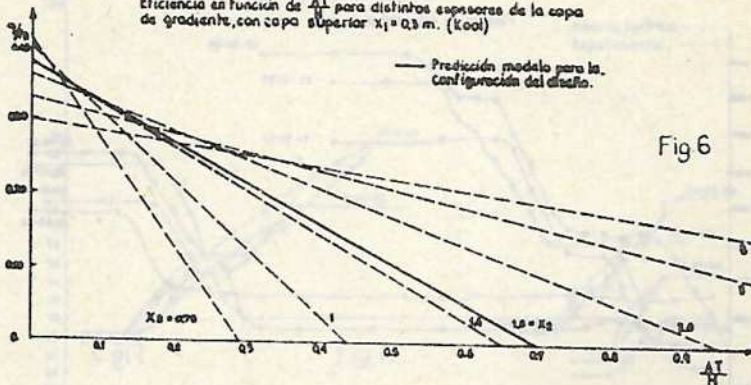
Fig 3

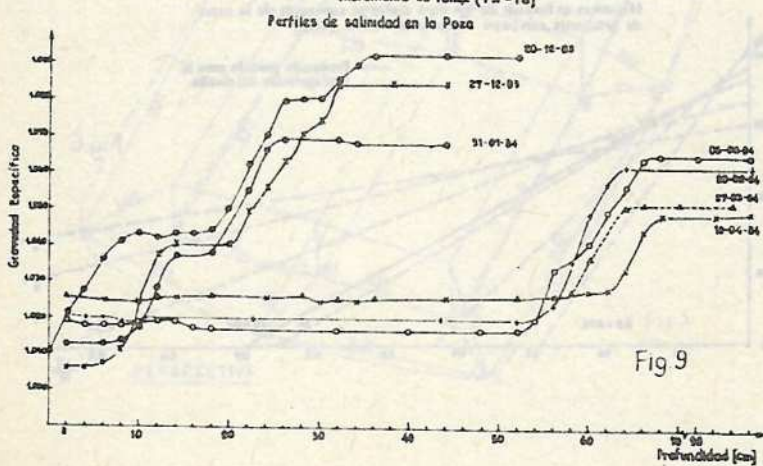
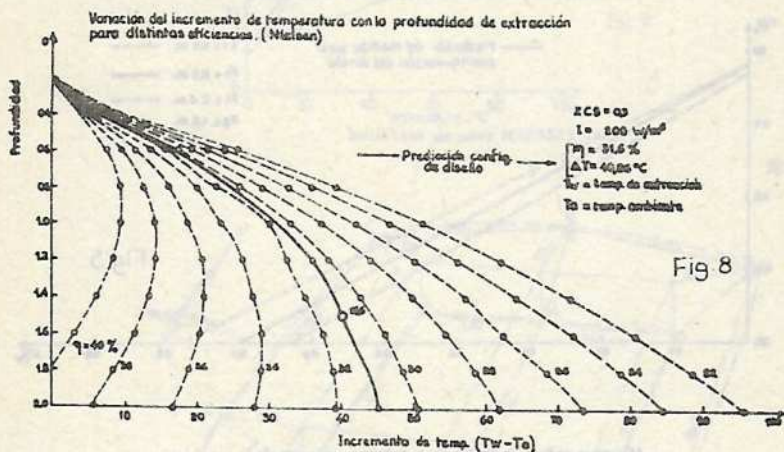
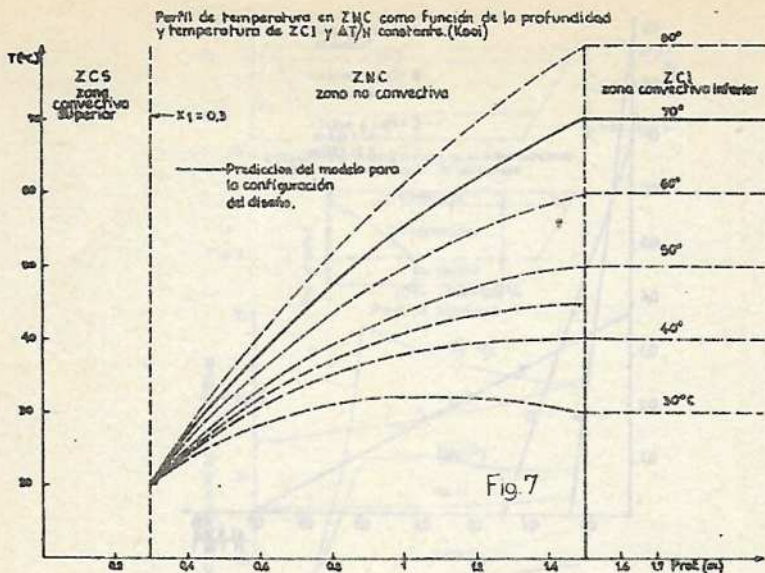


Eficiencia para distintos espesores de ZCS (Kool)



Eficiencia en función de  $\frac{\Delta T}{H}$  para distintos espesores de la capa de gradiente, con capa superior  $x_1 = 0.3 \text{ m}$ . (Kool)







Perfiles de temperatura en la Posa

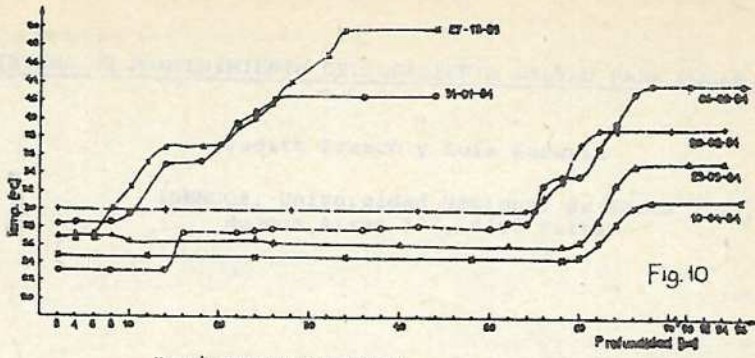


Fig. 10

VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN ZC0 Y ZC1.  
CALOR ACUMULADO EN FUNCION DEL TIEMPO.

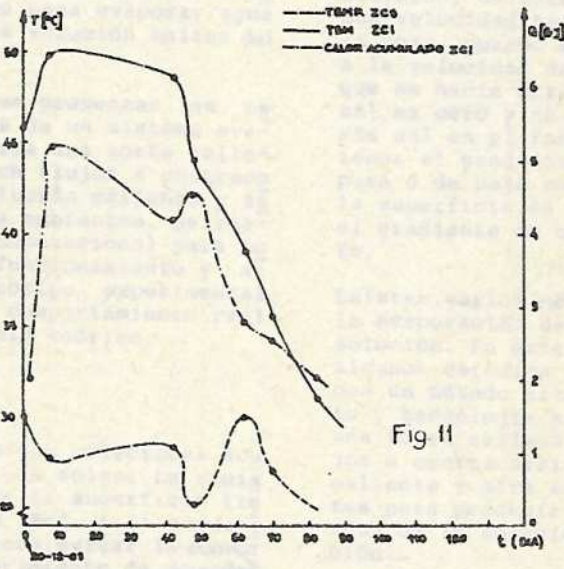


Fig. 11

Distribución de temperatura en la poza.

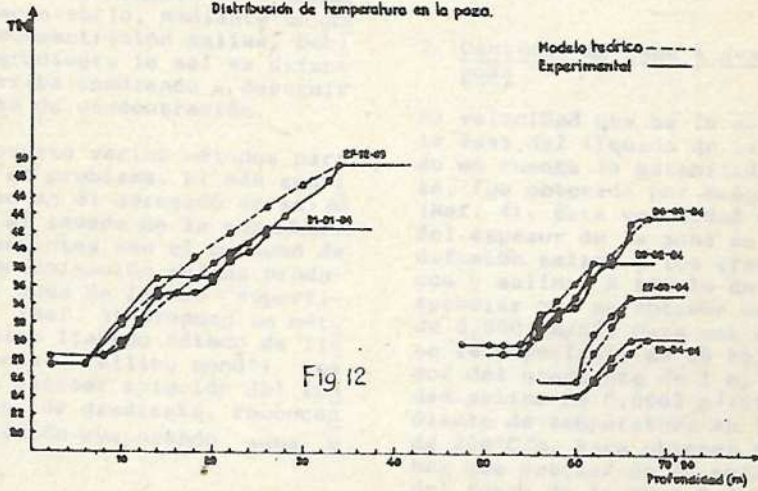


Fig. 12