

# CALENTAMIENTO DE UN ESTANQUE SOLAR DE GRADIENTE SALINO BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL EN EL SURESTE DE MEXICO

C. RAMOS, F. SIERRA, J. HUACUZ, J. BADILLO, F. VILLASEÑOR

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS  
APARTADO POSTAL 475, CUERNAVACA, MOR  
62000 MEXICO

## RESUMEN

En este artículo se presentan las características de construcción, así como las condiciones de desarrollo de la temperatura durante los ocho meses iniciales de calentamiento del primer estanque solar de gradiente salino para generación eléctrica en México. El estanque se encuentra ubicado aproximadamente a 18 ° latitud norte en el sureste de México. Su área de captación es de aproximadamente 3000 m<sup>2</sup> y una profundidad promedio de la solución de 3.8 m. Para la formación del gradiente se utilizó salmuera concentrada al 25 % en peso de cloruro de sodio. Inicialmente se depositó salmuera concentrada hasta un nivel igual a la mitad del espesor de diseño de la zona no convectiva, pero un período de condiciones climatológicas adversas impidió la formación artificial de la zona de gradiente. No obstante, se observó la formación natural de un gradiente de 60 cm de espesor que propició un calentamiento del fondo del estanque del orden de 46 °C. Posteriormente y dadas las condiciones de la salmuera, se decidió volver a llenar el estanque con salmuera concentrada. Se formó el gradiente salino de 1.5 m, utilizando el método de redistribución de Zangrando. Se describe la etapa de calentamiento de este nuevo gradiente mediante la presentación de los perfiles de temperatura, gravedad específica e índice de turbidez de la salmuera.

## INTRODUCCION

Este proyecto se está llevando a cabo bajo un convenio de colaboración entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y Petróleos Mexicanos (PEMEX). Se dispone de salmuera en cantidad suficiente y con características adecuadas para la estratificación. Existe disponibilidad de agua dulce para las labores de formación del gradiente y su mantenimiento. El sitio está ubicado a 18 ° latitud norte, en una región tropical a 26 m sobre el nivel del mar. La radiación global promedio anual es de aproximadamente 4.5 kWh/m<sup>2</sup> y una temperatura promedio anual de 26 °C (1). Este es el primer estanque solar en México cuyo propósito es generar electricidad. El proyecto arrancó en septiembre de 1991. Inicialmente se llevaron a cabo estudios topográficos, análisis de laboratorio de muestras de agua dulce y de salmuera, entre otros estudios básicos. Actualmente se está llevando a cabo el calentamiento inicial de la salmuera contenida en el estanque. La máxima temperatura en la zona de almacenamiento alcanzada hasta la elaboración de este artículo ha sido cercana a los 60 °C.

## DESCRIPCION DEL ESTANQUE SOLAR

La existencia de un reservorio que se utilizaba para almacenar agua dulce, facilitó la construcción del estanque solar. Este reservorio es de forma rectangular, con dimensiones en su parte superior de 80 x 40 m, un área de colección de 3000 m<sup>2</sup> y una profundidad promedio de

4.5 m (fig. 1). Las paredes son inclinadas, tres de ellas con un ángulo aproximado de  $45^\circ$  y la pared restante de aproximadamente  $30^\circ$  de inclinación. Adyacente al estanque se encuentran otros reservorios, figura 1. Se vació el estanque para efecto de revisar su estructura y verificar que no existieran filtraciones de los reservorios adyacentes. En el período de esta acción se presentaron fuertes lluvias que provocaron serios daños a los taludes. Se requirió una labor de reconstrucción y las acciones llevadas a cabo por el personal de PEMEX, consistieron en colocar pilotes de tubería y placas de acero para contener los taludes (fig. 2). Al finalizar estas actividades no se detectaron infiltraciones de los otros reservorios. Esto evitó el uso de forros sintéticos para impermeabilizar el estanque. El estanque solar se diseñó para que tuviera una zona convectiva superior de 0.5 m, una zona de gradiente de 1.5 m y una zona de almacenamiento de 2m.

### DESCRIPCION DEL SISTEMA DE GENERACION ELECTRICA

Para efecto de generar electricidad con energía proveniente del estanque solar. Se instaló una máquina térmica operando bajo un ciclo termodinámico Rankine con un fluido orgánico como sustancia de trabajo. Esta es una máquina de 10 kW similar a las utilizadas para generar energía eléctrica con fuentes geotérmicas. Las condiciones para que esta máquina sea capaz de generar los  $10^3$  kW son que sea alimentada con un flujo de salmuera caliente de  $11 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $80^\circ \text{C}$  en el evaporador, y un flujo de agua de enfriamiento de  $11 \text{ m}^3/\text{h}$  en el condensador.

### INSTRUMENTACION

La instalación cuenta con una estación meteorológica con objeto de medir la radiación solar, temperatura ambiente, dirección y velocidad de viento, entre otras variables. Se cuenta con un laboratorio químico para el análisis de la salmuera utilizada en el estanque. Las mediciones locales de densidad de la salmuera se llevan a cabo obteniendo muestras y medidas con un densímetro, marca Anton Paar DMA35. Para la extracción de las muestras se utiliza una bomba pequeña de 1/8 de hp a un flujo constante de 1 l/min, a través de una manguera de 3 mm de diámetro interior. Las mediciones de densidad se realizan a intervalos de 5 cm en toda la profundidad del estanque. Las mediciones de temperatura de la salmuera se llevan a cabo con un termopar tipo J con la misma resolución espacial. Para facilitar las labores de muestreo de la salmuera y para la colocación de otros equipos se instaló un puente de observación.

### PROCESO DE LLENADO Y ESTRATIFICACION NATURAL

Por primera vez se depositó salmuera concentrada dentro del estanque durante el verano de 1992. La superficie de la salmuera alcanzó una altura de 2.75 m (nivel cero la base del estanque). En este período se presentaron fuertes vientos alrededor de los 50 km/h y precipitación pluvial acumulada cercana a los 900 mm. Esto provocó la suspensión del proceso de formación del gradiente. Durante esta etapa se monitoreó el estanque y se detectó la presencia de un gradiente de aproximadamente 60 cm. Este se formó naturalmente por efecto del viento y el agua adicionada por lluvia. Los gradientes de

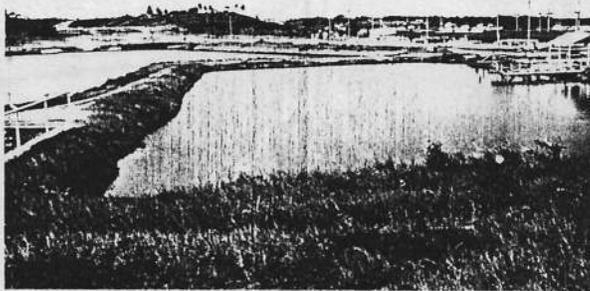


Figura 1 Estanque solar

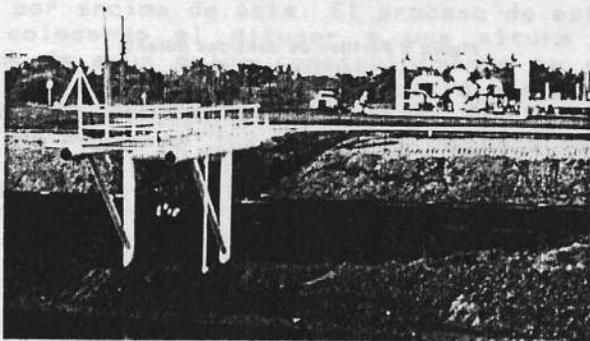


Figura 2 Estanque solar reconstruido

densidad y temperatura detectados fueron de  $300 \text{ kg/m}^4$  y  $26 \text{ }^\circ\text{C/m}$  respectivamente. En las figuras 3 y 4 se muestran los perfiles de densidad y temperatura formados naturalmente. Desde finales de octubre hasta finales de diciembre de 1992, se detectaron temperaturas en el fondo de hasta  $46 \text{ }^\circ\text{C}$ . Después de este período de mal tiempo se decidió formar el gradiente artificial como originalmente se había planeado. Por tal razón, se tuvo la necesidad de evacuar cierta cantidad de salmuera diluida de la superficie. Desafortunadamente, en esta labor se colocó la succión de la bomba de extracción dentro de la zona donde se tenía salmuera concentrada, disminuyendo considerablemente el inventario de sal.

#### FORMACION DEL GRADIENTE ARTIFICIAL

Nuevamente se depositó salmuera concentrada y se inició la formación del gradiente artificial en enero 27 de 1993, utilizando el método de redistribución (2). Para crear la zona de gradiente se utilizó un difusor circular, hecho con discos de acrílico de 10 mm de espesor, y 1 m de diámetro y con una separación entre discos de 0.006 m. El

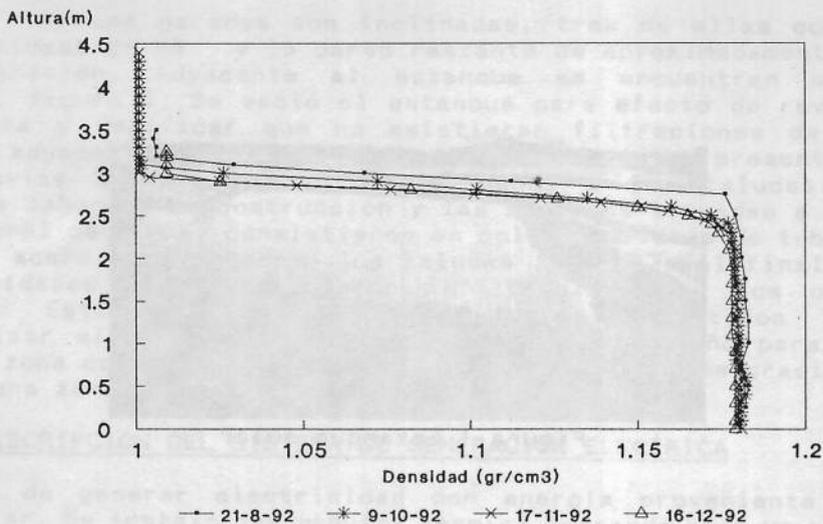


Figura 3 Perfiles de densidad durante la estratificación natural

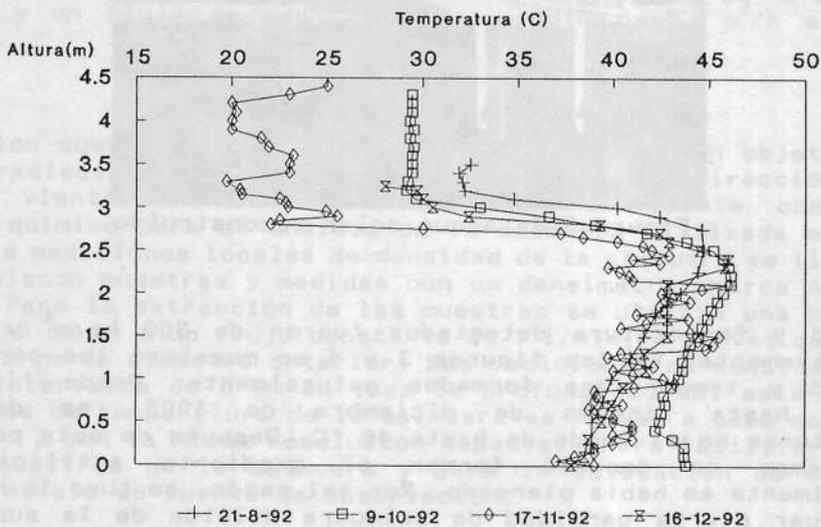


Figura 4 Perfiles de temperatura durante la estratificación natural

difusor se colocó en el extremo del puente sostenido por un mecanismo para controlar su movimiento ascendente o descendente, (fig. 5). El flujo de agua dulce utilizado fue de 12 m<sup>3</sup>/h (menor que el especificado, 20 m<sup>3</sup>/h) limitado a ese valor por la infraestructura disponible en las instalaciones de PEMEX. Lo anterior provocó que la velocidad a la salida del difusor no realizara un mezclado adecuado

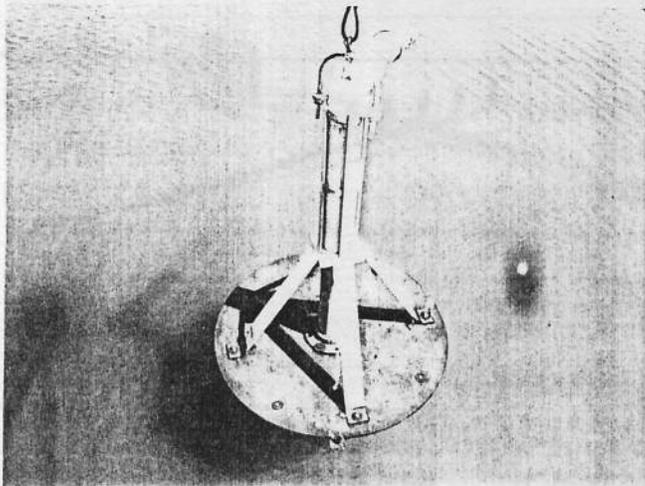


Figura 5 Difusor para la estratificación

de la salmuera por encima de éste. El proceso de estratificación se llevó a cabo colocando el difusor a una altura de 2.1 m y se inyectaron 5 cm de agua dulce, posteriormente se elevó 5 cm y se inyectaron 2.5 cm, así el proceso se repitió hasta que se alcanzó a formar el gradiente de 1.5 m de espesor. En las gráficas de las figuras 6 y 7 se muestran los perfiles de densidad alcanzados al término de la estratificación. Los perfiles de temperatura durante este proceso no fueron obtenidos debido a falla en los sensores de temperatura.

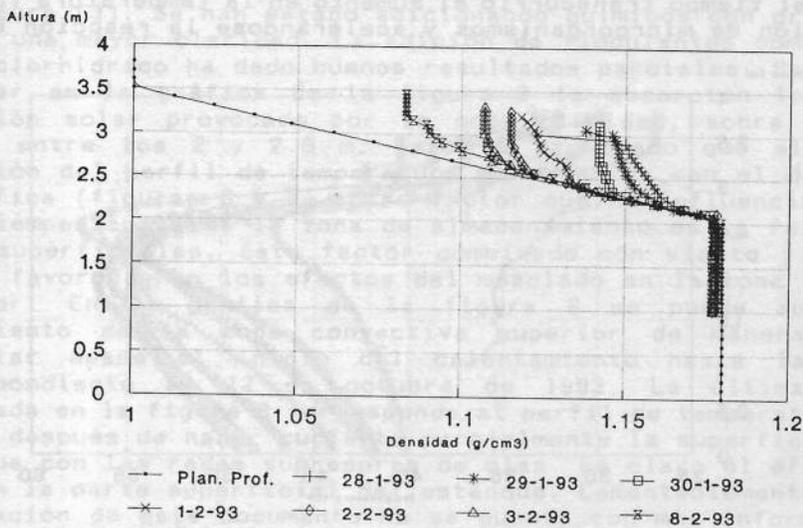


Figura 6 Perfiles de densidad durante la formación del gradiente

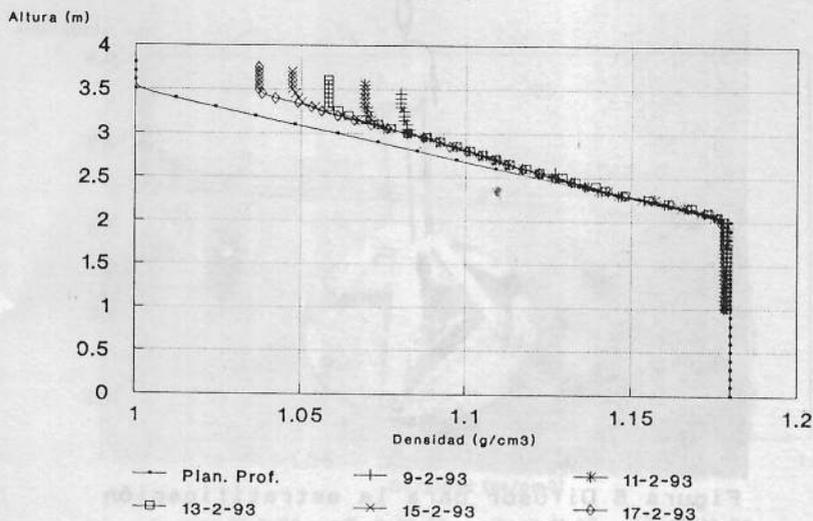


Figura 7 Perfiles de densidad durante la formación del gradiente

### CALENTAMIENTO INICIAL

Terminadas las labores de estratificación el estanque empezó a ganar temperatura como se muestra en la figura 8 y manteniendo un perfil de densidad como se muestra en la figura 9. Al inicio el calentamiento fue relativamente más pronunciado. Sin embargo, conforme el tiempo transcurrió el aumento en la temperatura favoreció la formación de microorganismos y acelerándose la reacción química

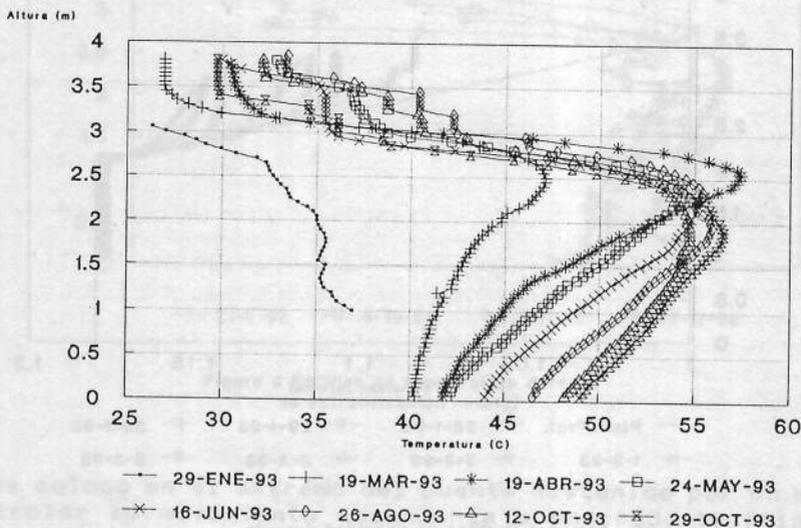


Figura 8 Perfil de temperatura durante el calentamiento inicial

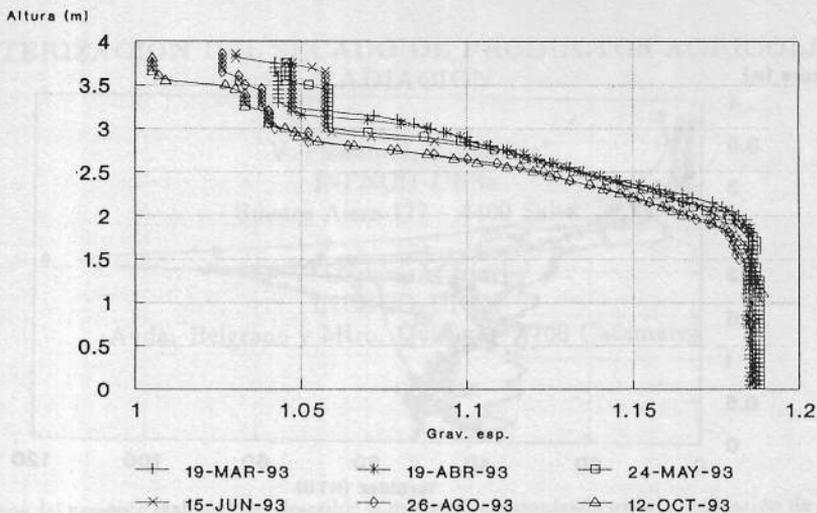


Figura 9 Perfiles de gravedad específica durante el calentamiento inicial

de la salmuera en contacto con las placas de acero disminuyendo notablemente la claridad del estanque. En la figura 10 se muestra el perfil del índice de turbidez. Estos índices y la coloración de la salmuera revelan la presencia de partículas en suspensión y colonias de microorganismos que impiden que la radiación solar alcance el fondo del estanque. Estos índices comparados con los existentes en otros estanques están muy por encima de los valores reportados en la literatura (3). Se han estado adicionando químicos con propósito de lograr una mayor claridad. La adición de floculantes combinado con ácido clorhídrico ha dado buenos resultados parciales. Se puede apreciar en la gráfica de la figura 8 la absorción local de la radiación solar provocado por la poca claridad, sobre todo a la altura entre los 2 y 2.5 m. Esto ha provocado que el punto de inflexión del perfil de temperatura no coincide con el de gravedad específica (figuras 8 y 9). Otro factor que ha influenciado en las bajas temperaturas de la zona de almacenamiento es la falta de las redes superficiales. Este factor combinado con viento y lluvia en exceso favorecieron los efectos del mezclado en la zona convectiva superior. En la gráfica de la figura 8 se puede apreciar el crecimiento de la zona convectiva superior de manera bastante irregular desde el inicio del calentamiento hasta la medición correspondiente al 12 de octubre de 1993. La última medición reportada en la figura 8 corresponde al perfil de temperatura tomado 2 días después de haber cubierto parcialmente la superficie del estanque con las redes supresoras de olas. Es claro el efecto sobre todo en la parte superficial del estanque. Lamentablemente hasta la elaboración de este documento no se cuenta con más información que muestre el efecto real de las redes. En trabajos futuros se presentarán estos resultados así como las primeras pruebas de la máquina de generación.

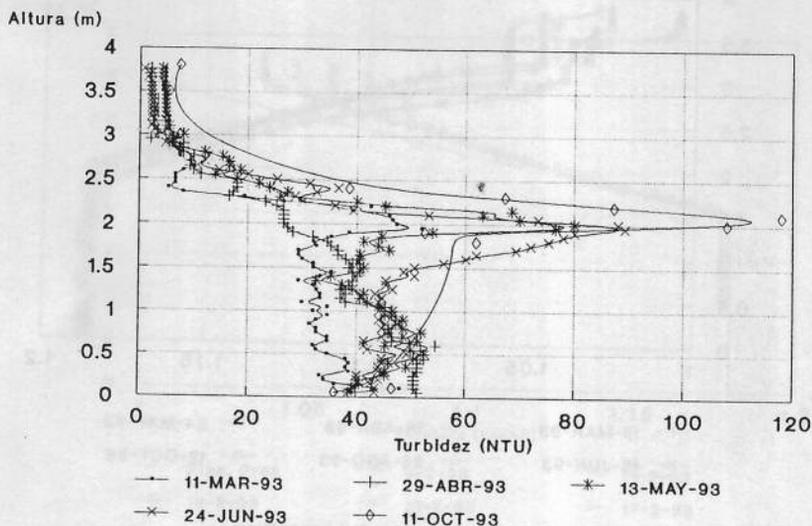


Figura 10 Claridad de la salmuera contenida en el estanque solar

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece profundamente la participación del personal de PEMEX y del IIE que hicieron realidad la idea de contar con la primera planta helioeléctrica de estanque solar para generar energía eléctrica en México.

### REFERENCIAS

- (1) Atlas climático del estado de Veracruz  
 A. Tejeda, F. Acevedo, E. Jáuregui  
 Universidad Veracruzana, Abril 1989
- (2) A simple method to establish salt gradient solar ponds  
 F. Zangrado  
 Solar Energy, vol 25, No. 5, pp. 467-470, 1980
- (3) El Paso Solar Pond Test Project, Quarterly report  
 A.H.P. Swift, P. Golding  
 University of Texas at El Paso, December 1991