

MODELO DE LABORATORIO PARA EXPERIENCIAS DE MANTENIMIENTO
DEL GRADIENTE SALINO DE UNA POZA SOLAR

Gustavo Hannecke y Graciela Lesino*
INENCO#, Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

Resumen

Se encara con el presente trabajo el estudio de inyecciones de fluidos en distintas capas de una poza solar, como así el estudio de las posibilidades de un método de corrección del gradiente mediante una única inyección de solución concentrada.

Para el logro de estos objetivos se construyó un modelo de laboratorio en donde se arma una poza en escala y se realizan inyecciones de fluido coloreado, variando los parámetros en juego de entre los cuales se destacan la densidad y la velocidad del fluido inyectado.

Introducción

Las pozas solares son colectores-acumuladores de energía solar de tipo piscina. Están formadas básicamente por tres capas de solución salina: la primera se encuentra en la superficie de la poza y debe mantenerse con un espesor menor a los 30 cm. Se caracteriza por ser de agua casi pura, convectiva e isotérmica; su temperatura fluctúa con las oscilaciones diarias.

Por debajo de esta capa convectiva superficial se encuentra una segunda capa de solución salina, que constituye un gradiente de densidad y temperatura, positivos hacia abajo. Su altura es variable y de su grosor depende la eficiencia térmica que alcance la poza. Una altura típica oscila alrededor de 1 m de gradiente. Este gradiente es la zona no convectiva de la poza y actúa como aislante de la capa más profunda.

La capa más profunda es convectiva e

isotérmica, formada por solución salina concentrada y actúa como zona acumuladora de calor. La Fig. 1 esquematiza una poza típica y junto a ella los perfiles de densidad y temperatura.

Como el gradiente de densidad está formado por solución de sal en agua, por efecto de la difusión de la sal se produce un debilitamiento progresivo del gradiente. A causa de este debilitamiento puede suceder que alguna zona dentro del gradiente comience a convectar, formándose una capa convectiva dentro del gradiente mismo. Esto resulta contraproducente en la eficiencia de la poza, ya que al disminuir el espesor de la capa aislante, disminuye la eficiencia. En casos extremos en que estas capas no detengan su crecimiento, estabilizándose, pueden destruir la poza.

Para evitar la disminución en la eficiencia hay que hacer un mantenimiento adecuado del gradiente (1). En caso de que se formen capas convectivas internas y éstas no desaparezcan en forma natural, es necesario hacer una corrección de las mismas. La Fig. 2 esquematiza una poza solar con una capa convectiva interna al gradiente.

Un método de corrección usado es el propuesto por F. Zangrando, similar al empleado para formar el gradiente (2) y consiste en elegir la zona más angosta del gradiente resultante y hacer un barrido de inyecciones de la capa convectiva no deseada y de la zona del gradiente elegida. Este método presenta la desventaja de implicar, en términos globales, un desplazamiento de sal hacia arriba, lo que incrementa en el futuro la necesidad de mantenimiento.

En un trabajo anterior (3) el Instituto logró corregir una capa convectiva de 23 cm interna en el gradiente de la poza de 600 m², con una sola inyección de solución concentrada.

* Miembro de la Carrera de Investigador Científico del CONICET

Instituto UNSa. -CONICET

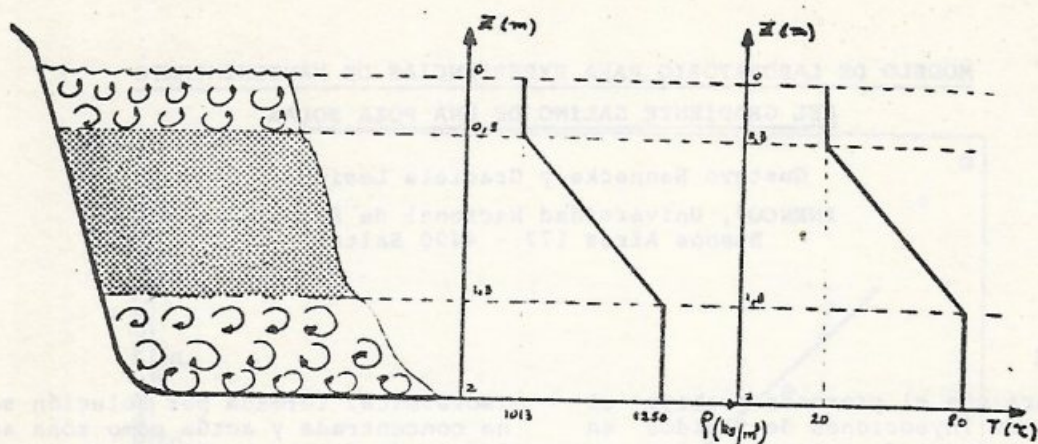


Fig. 1

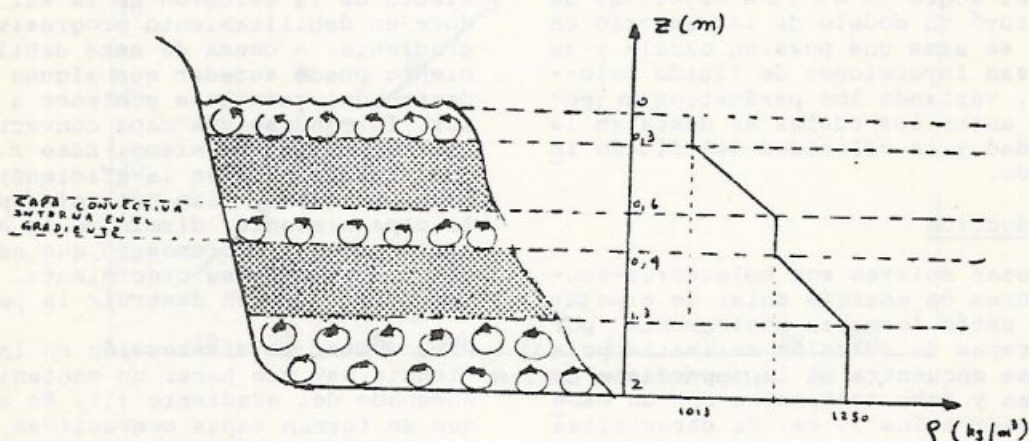


Fig. 2

Un principio de explicación es que se consiguió un punto de regulación tal que se desestabilizó la capa convectiva interna, permitiendo nuevamente la formación del gradiente. Esta experiencia involucra una consecuencia práctica importante, ya que permitiría desarrollar un método de corrección del gradiente más rápido y un menor levantamiento de sal respecto al método propuesto anteriormente.

A fin de cuantificar este método se construyó un modelo de laboratorio, en el que se llevan a cabo experiencias de inyección de solución coloreada para estudiar su comportamiento dentro de las distintas capas de la poza.

Números adimensionales

El comportamiento de un fluido inyectado dentro de una capa de densidad diferente a la de éste depende de la diferencia de densidades y de la velocidad de inyección. El número adimensional que caracteriza este comportamiento es el de Richardson, que se define como:

$$Ri = g \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho_i} \cdot \frac{d}{v^2}$$

El número de Richardson está relacionado con el de Froude por:

$$Ri = 1 / Fr^2$$

Para el caso en que la diferencia de densidad se debe sólo a la temperatura el Fr está definido como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot \delta}}$$

Existe un valor crítico del Ri (Ri = 0.85) por encima del cual el fluido inyectado no se mezcla con el de la capa homogénea sino que penetra en ella estratificándola.

Puede calcularse la distancia de penetración como:

$$x = \frac{\rho_i \cdot C_p \cdot q \cdot \Delta T}{Q}$$

y el valor de q se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$q = \frac{\eta \cdot H_s \cdot L}{\rho_c \cdot C_p \cdot \Delta T}$$

Por el contrario si el Ri es menor que 0.85 el fluido inyectado se mezcla con la capa homogénea, produciéndose así una rápida dispersión del mismo.

El otro número adimensional a tener en cuenta es el Reynolds, definido como:

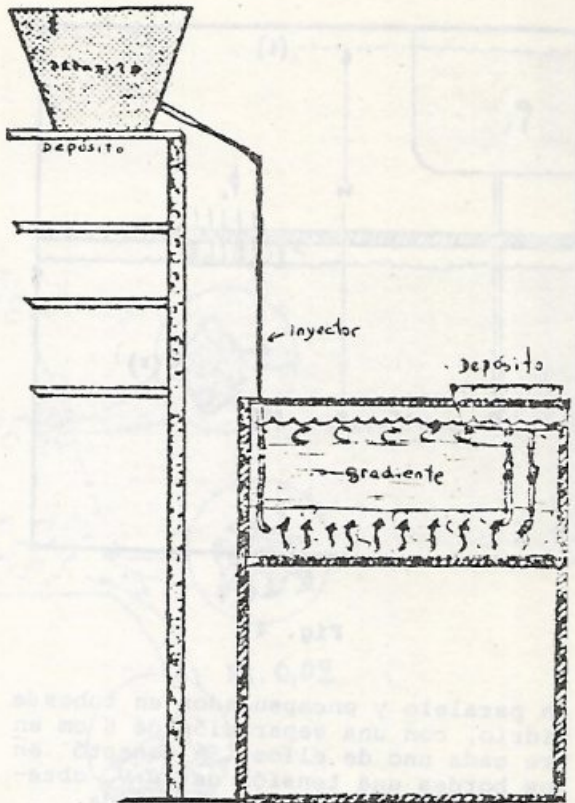
$$Re = \frac{\rho_i \cdot v \cdot \delta}{\mu}$$

Debe asegurarse que el valor del Re se mantenga por debajo de 2000, a fin de que el flujo sea de tipo laminar. Con esta restricción y teniendo en cuenta que μ y ρ están predeterminados por cada situación en particular el producto $v \cdot \delta$ se convierte en un parámetro importante a tener en cuenta cuando se diseña el proceso de inyección.

Modelo de Laboratorio

A fin de estudiar los rangos de los números adimensionales mencionados en problemas hidrodinámicos relativos a pozas solares y en particular para obtener más información sobre las posibilidades del método de corrección del gradiente por inyección directa, se construyó el modelo de laboratorio esquematizado en la Fig. 3. Consiste en un recipiente de base rectangular de 100 x 30 cm², con paredes de vidrio de 50 cm de altura. Para la primera experiencia se construyó un gradiente salino (con el método de F. Zangrando) de 20 cm de espesor sobre una capa convectiva del mismo grosor. La concentración de la capa convectiva era del 6% y su temperatura media de 33 C. Los valores de los gradientes de densidad y temperatura son:

$$\Delta \rho / \Delta z = (1048-1000)/(24-4) \text{ (kg/m}^3\text{/cm)} = 2.4 \text{ kg/m}^3\text{/cm}$$



$$\Delta T / \Delta z = (33-20)/(24-4) \text{ }^\circ\text{C/cm} = 0.65 \text{ }^\circ\text{C/cm}$$

Una poza solar real típica presenta en su superficie una densidad $\rho = 1013 \text{ kg/m}^3$ y en su capa de acumulación $\rho_c = 1250 \text{ kg/m}^3$ con un metro de gradiente. Las temperaturas medias son de alrededor de 20 °C en la capa superficial y 80 °C en la capa de acumulación. Estos valores dan para los gradientes los siguientes resultados:

$$\Delta \rho / \Delta z = 2.37 \text{ kg/m}^3\text{/cm}$$

$$\Delta T / \Delta z = 0.6 \text{ }^\circ\text{C/cm}$$

Se observa en base a estos resultados que se conservan en el modelo los valores de los gradientes de densidad y temperatura típicos de pozas solares en escala real.

Para mantener convectando la capa del fondo se construyó un calefactor que entrega una potencia equivalente a la colectada por una poza solar. Es decir, partiendo del hecho que sobre una poza solar real incide una radiación media del orden de 600 W/m² y que de esta cantidad alcanza el fondo de la poza aproximadamente la mitad, el calefactor diseñado para el modelo debe entregar alrededor de 100 vatios. Se lo construyó poniendo 4 hilos de constantán (de 1 m cada uno y con una resistencia de 4 Ω /m)

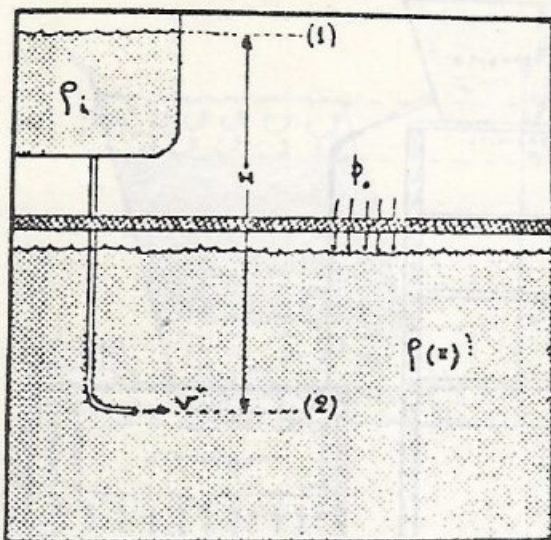


Fig. 4

en paralelo y encapsulados en tubos de vidrio, con una separación de 6 cm entre cada uno de ellos. Se conectó en los bordes una tensión de 10 V, obteniendo así la potencia requerida.

Para el control de la velocidad se usaron dos métodos: a) inyecciones de fluidos desde un depósito de altura variable. La Fig. 4 esquematiza esta situación.

La relación entre la altura del depósito y la velocidad de inyección se calcula a partir de Bernoulli de la siguiente manera:

Se toma en el punto (1) un potencial de referencia igual a cero y se plantea entre (1) y (2) la siguiente identidad:

$$P_0 + \rho_i \cdot g \cdot H = P_2 + \rho_i \frac{v^2}{2 \cdot g} + \Delta P (\text{pérdidas})$$

P_2 es la presión en el punto 2 y se calcula a partir de la siguiente identidad:

$$P_2 = P_0 + \int \rho(z) \cdot g \cdot dz$$

Para gradientes lineales la integral es perfectamente evaluable y se llamará a su valor I.

De las relaciones anteriores se puede despejar el valor de la velocidad como:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (g \cdot h - I / \rho_i - \Delta P / \rho_i)}$$

Se puede calcular v en forma aproximada

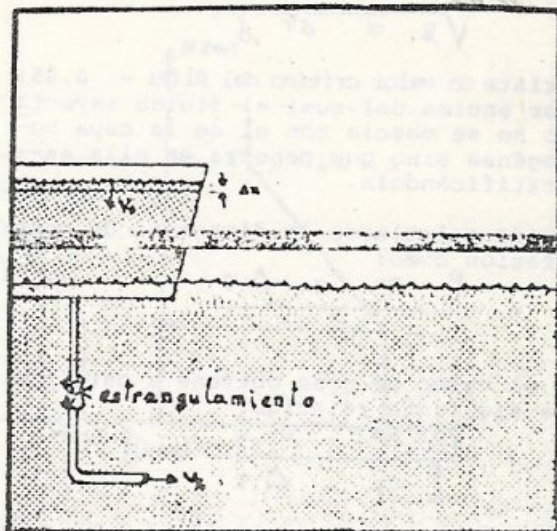


Fig. 5

da poniendo $\Delta P = 0$ para diseñar el rango de variación. De esta forma se obtienen velocidades que van desde los 0.1 m/s a los 4 m/s.

b) Para cubrir rangos menores de velocidad se utiliza un método distinto que consiste en estrangular los caños de inyección. La Fig. 5 muestra un esquema de este método.

Por conservación de masa de cumple que:

$$Q_1 = Q_2 \quad (Q_i: \text{caudal})$$

es decir:

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (A_i = \text{áreas})$$

Midiendo la velocidad V , como: $\Delta x / \Delta t$ y conociendo la relación de áreas A_1 / A_2 , se puede obtener el valor de V_2 de la velocidad de inyección.

Experiencias y resultados

Se realizaron distintas experiencias haciendo variar los parámetros en juego, es decir: V , ρ y ρ_i y se tomaron fotografías de los resultados. La Fig. 6 muestra distintos esquemas de las observaciones realizadas.

Estos resultados muestran que en pozos solares se mantiene el número crítico $Ri = 0.85$ por encima del cual se produce la estratificación del fluido inyectado dentro de la capa homogénea.

Se observó que aún cerca del número lí

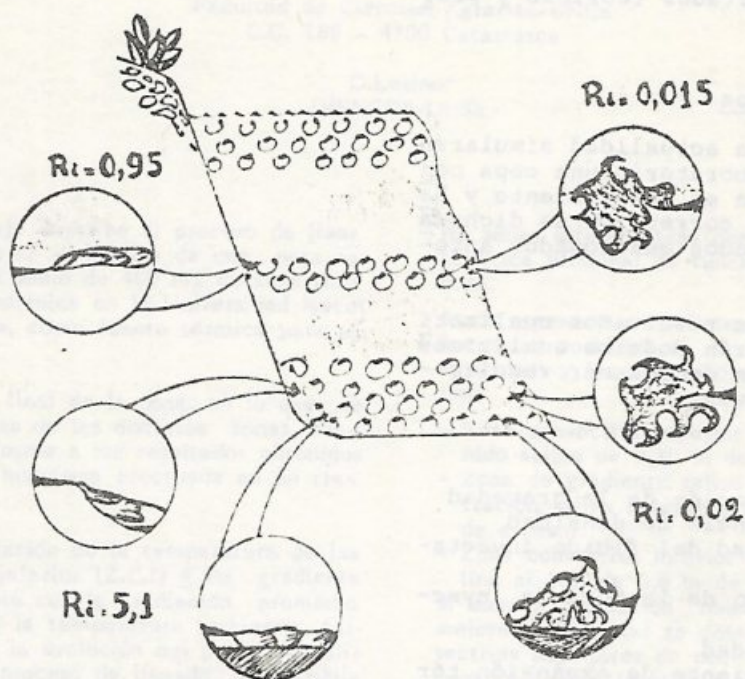


Fig. 6

mite del fluido inyectado continúa mezclándose bastante bien con el fluido circundante.

Pasado este límite se observa claramente como el fluido inyectado se mueve dentro del circundante, independiente de este último y penetrando sin producirse mezcla.

Se realizaron también inyecciones cerca de la interfase capa convectiva-gradiante y se observó que mientras la velocidad se mantuvo por debajo de 1 m/s la interfase no era afectada notablemente. En dos oportunidades se realizaron inyecciones en esta zona con velocidades notablemente superiores a 1 m/s (alrededor de 2 m/s) y el gradiente fue erosionado hasta disminuir 4 cm en su espesor original, es decir un 25% de disminución. Se concluye de és

to que no es conveniente hacer inyecciones cerca de la interfase y, si fue necesario, por lo menos cuidar de no exceder el valor de 1 m/s en la velocidad de inyección.

En una ocasión se realizó una inyección de solución con densidad de 1054 kg/m³, con una boca de 9 mm de diámetro y una velocidad de 0.00065 m/s. En esta oportunidad el fluido penetró una distancia de 65 cm. Una vez que alcanzó este valor dejó de penetrar y la capa inyectada comenzó a "inflarse" homogéneamente. El cálculo teórico de dicha distancia de penetración es el siguiente:

$$x \text{ (m)} = \frac{\rho_i \cdot C_p \cdot q \cdot \Delta T}{Q}$$

con: $C_p = 3.34 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ y $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. Se estima el valor de Q en 250 W/m². El

valor de q se calcula como el producto de $V \times \delta$ y es igual a: $5.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Con estos datos el valor de la distancia de penetración es: $x = 80.1 \text{ cm}$ de lo que se observa un buen acuerdo entre los resultados teóricos y prácticos.

Trabajos futuros

Se encara en la actualidad simular en el modelo de laboratorio una capa convectiva interna en un gradiente y hacer pruebas de corrección de dicha capa con los métodos mencionados anteriormente.

A partir de los resultados cualitativos se plantearán modelos analíticos sencillos a fin de obtener resultados cuantitativos.

Nomenclatura

g	: aceleración de la gravedad
$\Delta \rho$: diferencia de densidad
ρ_i	: densidad del fluido inyectado
δ	: diámetro de la boca de inyección
V	: velocidad
α	: coeficiente de expansión térmica
ΔT	: diferencia de temperatura
C_p	: calor específico
q	: flujo por unidad de ancho de boca de inyección
Q	: ganancia de calor en la capa
η	: eficiencia térmica
H_s	: radiación superficial
L	: longitud de la capa
μ	: viscosidad del fluido
P_o	: presión atmosférica
H	: altura.

Referencias

1. Nielsen, C.F.: "NON CONVECTIVE SALT-GRADIENT SOLAR PONDS", de "SOLAR ENERGY TECHNOLOGY HANDBOOK"- Part A-cap.11; Dickinson, W.C. and Chermisinoff, P.M.; eds.: Marcel Dekker, New York 1980.
2. Zangrando, F.: "OBSERVATION AND ANALYSIS OF A FULL SCALE EXPERIMENTAL SALT GRADIENT SOLAR POND". Tesis. The University of New Mexico, May 1979.
3. Lesino, G., Saravia, L., Cenzano, S., Blasco D., Cadena, C. y Caso, R.: "POZA DE SULFATO DE SODIO DE 600 m²: CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO". Actas de la 8a. Reunión de Trabajo de ASADES. La Pampa, 1983.