

MODELO FENOMENOLOGICO DEL CRECIMIENTO DE
UNA CAPA CONVECTIVA EN UNA POZA SOLAR

Mangussi, J., Saravia, L*, Lesino, G.

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO)
Universidad Nacional de Salta
4400 - Salta - Argentina

RESUMEN

Se estudian los mecanismos de crecimiento y arranque de la capa convectiva inferior de una poza solar. Para ello se propone un modelo fenomenológico de tipo numérico cuyos resultados se comparan con los experimentales de una poza de NaCl de laboratorio. Se miden los perfiles de temperatura en la zona de interfase capa-gradiente y de ellos se obtiene la evolución temporal de la temperatura de la capa y de su espesor. Los resultados del modelo numérico se ajustan a los valores experimentales variando las difusividades térmicas y salina en la zona de interfase y la condición de estabilidad en la densidad.

1. INTRODUCCION

En una poza solar se distinguen tres zonas. 1) En la parte superior una capa a temperatura ambiente y con igual concentración de sal en todos sus puntos. 2) En el centro una zona cuya temperatura y concentración de sal de crecen linealmente de abajo hacia arriba. En ella, la solución salina que no tiene movimientos verticales se comporta como un sólido aislante. 3) En la parte inferior existe una capa con temperatura y concentración de sal iguales en todos sus puntos y mayores que las correspondientes a las otras dos zonas. En esta capa convectiva inferior está acumulada la mayor parte de calor utilizable.

La capa convectiva inferior se detecta al cabo de un tiempo aún cuando no haya existido en el instante inicial. Con el tiempo esta capa crece hacia arriba a expensas de la zona de gra-

diente, disminuyendo la zona de aislamiento y aumentando las pérdidas. Es de especial importancia poder controlar su evolución y para ello se necesita conocer los mecanismos físicos de arranque y crecimiento.

2. MODELO EXPERIMENTAL

Los detalles constructivos del dispositivo experimental, los sistemas de medida y el método de construcción del gradiente lineal de densidad han sido descritos en un trabajo previo (1).

El perfil de densidad de los 40 cm próximos al fondo de una poza solar real de 1 m de profundidad, ubicada en Salta se ha reproducido en el modelo de laboratorio.

Las densidades fueron: 1180 Kg/m³ en el fondo y 1120 Kg/m³ en la superficie, y en las tres experiencias realizadas el gradiente de densidad en los 12 cm próximos al fondo fue: 160 Kg/m³m.

Se estima en 11 MJ/m² día la radiación que llega al fondo de la poza real. El modelo tendrá el mismo aporte de calor al recibir en el fondo 32 watt, de origen eléctrico a lo largo de las 24 horas.

Se han realizado tres experiencias, que difieren sólo en el valor, constante en el tiempo, de la potencia eléctrica suministrada (Experiencia 1: 32 watt; experiencia 2: 23 watt; experiencia 3: 40 watt). La duración de cada una fue aproximadamente cinco días. La temperatura ambiente y el gradiente inicial de densidades fueron lo mismo para las tres experiencias. En cada una se midieron:

a) Perfiles de densidad inicial y fi-

* Investigador de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

nal.

b) Perfil de temperatura, durante los cinco días, en la zona de interfase, con un sensor vertical solidario a la interfase según se muestra en la Fig. 1.

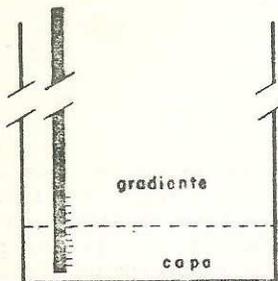


Figura 1 - Ubicación del sensor vertical de temperaturas en la poza

El sensor vertical tiene 9 termocuplas cobre-constantán, de las cuales las 7 centrales están separadas entre sí 8 mm y las 2 de los extremos 1,5 cm. La señal eléctrica proporcionada por las termocuplas se recibió en un registrador potenciométrico, a razón de dos perfiles cada cinco minutos.

3. ELABORACION DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Los registros de temperaturas se dividen en intervalos de 20 minutos. Se dibuja un perfil cada 40 minutos promediando los datos de 20 minutos. De estos perfiles se obtiene:

- La temperatura de la capa en función del tiempo.
- La altura de la capa en función del tiempo.

El método para evaluar la altura de la capa que se muestra en la Fig. 2 es el siguiente: Se elige un perfil como referencia; al tiempo t_0 ; se le superpone el perfil correspondiente al tiempo $t = t_0 + \Delta t$. Por lo general, estos perfiles no coinciden. Se desplaza el nuevo paralelamente a sí mismo sobre el de referencia, hasta que las áreas no coincidentes son mínimas y se compensan. El desplazamiento necesario para llegar a esta situación se interpreta como el espesor ΔZ en que aumento la capa en el intervalo Δt .

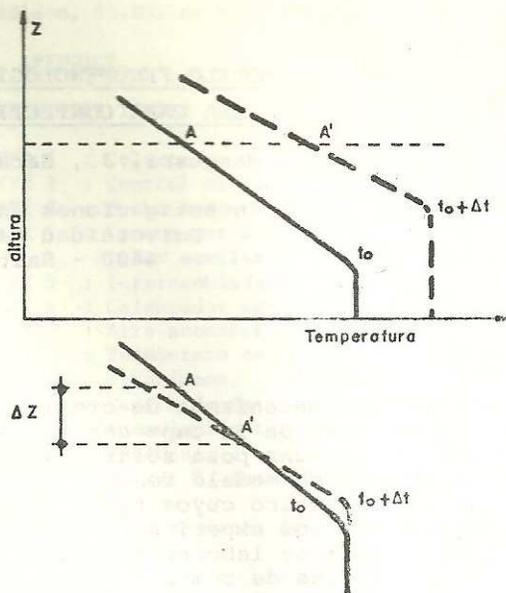


Figura 2 - Cálculo del crecimiento ΔZ de la capa en el tiempo Δt .

4. MODELO FENOMENOLOGICO

El análisis teórico del fenómeno de crecimiento de la capa convectiva en los rangos de valores de los parámetros correspondientes al caso de una poza solar es discutido en la actualidad no habiéndose llegado a conclusiones definitivas.

En tales circunstancias y dada la necesidad de predecir este crecimiento por diversas razones de orden práctico, en este trabajo se propone introducir una modelización fenomenológica con algunos parámetros cuyos valores no son determinables por vía teórica, sino que se ajustan a través de algunos resultados experimentales obtenidos en condiciones de laboratorio. El modelo contempla la existencia de la zona de gradiente y la zona convectiva inferior, postulando la aparición de una región de interfase entre ambas. En cambio no se considerará por ahora la zona convectiva superior. En las dos primeras zonas se plantean los balances de masa y energía, así como los de difusión másica y térmica con exactitud. La región de interfase es la que controla el proceso de crecimiento de la capa inferior y allí se adoptan dos hipótesis fenomenológicas, una pa-

ra el criterio de desestabilización y otra para el proceso de difusión térmica y másica. A continuación se explican en detalle tales balances e hipótesis.

Las variables que se mencionan en esta sección están definidas en la sección 8. NOTACION.

En un instante t cualquiera los perfiles de temperatura y concentración de la poza se muestran en la Fig. 3. El modelo es unidimensional y se estudian las variaciones a lo largo del eje vertical z .

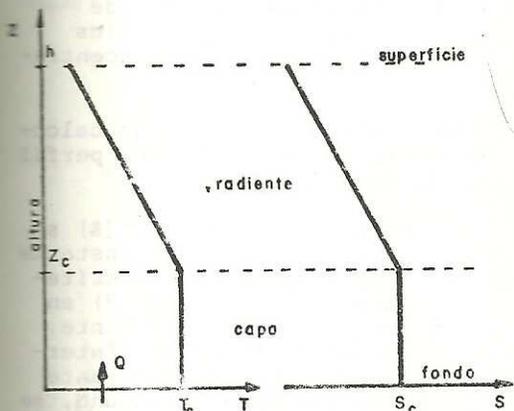


Figura 3 - Perfiles de concentración y temperatura de la poza en el tiempo t .

La temperatura y la concentración son funciones de la posición y del tiempo. La densidad y todos los parámetros físicos de la solución acuosa de NaCl, dependen de la temperatura y de la concentración y a través de ellas son, en definitiva funciones de la altura y el tiempo.

Las pérdidas laterales se calculan con el espesor y la conductividad térmica del aislante y la temperatura ambiente.

a) Balances en la zona de capa.

Se considera que en el instante t la capa está caracterizada por T_c, S_c, ρ_c, Z_c que variarán a $T_c + dT_c, S_c + dS_c, \rho_c + d\rho_c, Z_c + dZ_c$ en el tiempo dt . La variación de T_c y Z_c se muestran en la Fig. 4.

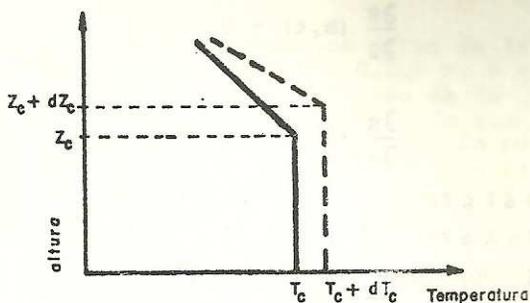


Figura 4 - Variación de la temperatura y altura de la capa en el tiempo dt .

Se omiten los términos de orden mayor o igual que 2.

El balance térmico es:

$$\frac{Q}{C_{PC} \cdot \rho_c} - \frac{1}{C_{PC} \cdot \rho_c} \frac{41Z_c}{A} \frac{ka}{e_a} (T_c - T_a) +$$

$$+ K_T^* \frac{\partial T}{\partial z} = Z_c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad 1$$

El balance de sal es:

$$K_S^* \frac{\partial S}{\partial z} = Z_c \frac{\partial S_c}{\partial t} \quad 2$$

b) Balances en la zona de gradiente.

$$K_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{C_p \rho} \frac{41}{A} \frac{ka}{e_a} (T - T_a) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3$$

El balance de sal es:

$$K_s \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = \frac{\partial S}{\partial t} \quad 4$$

c) Condiciones iniciales y de contorno.

Las condiciones iniciales son:

$$T(x, 0) = T_0(x)$$

$$S(x, 0) = S_0(x) \quad 5$$

Las condiciones de contorno:

$$\tilde{T}(h, t) = T_a$$

5. RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Se divide la altura efectiva de la poza en intervalos iguales ΔZ y se resuelven las Ec. 1) a Ec. 4) por un método de diferencias finitas explícitas.

La potencia real Q entregada a la solución, se calcula a partir de la potencia eléctrica medida Q_e de acuerdo al modelo desarrollado en un trabajo previo (1). Las dependencias funcionales de: $\rho(T, p)$; $C_p(T, p)$; $K_T(T, p) = k/C_p S$ y $K_S(T, S)$ han sido ajustadas a partir de valores de tablas (2).

En el caso de existir, se incluyen las dependencias de T_a y Q_e con el tiempo. Son datos de entrada, de acuerdo a la Ec. 5) los perfiles iniciales de temperatura y concentración.

El primero medido y el segundo calculado a partir de la medida del perfil inicial de densidades.

Conocidos $T(Z)$, $S(Z)$, $P(Z)$ y $\rho(Z)$ se calculan sus valores para el instante siguiente. Luego se aplica el criterio de desestabilización (Ec. 7) en todos los intervalos del gradiente. Si en ninguno se verifica, se interpreta que la capa no creció durante ese Δt . Si se verifica en alguno, se interpreta que la capa ha crecido hasta esa altura y se calculan los nuevos valores de S_c , P_c y ρ_c (entre 0 y el nuevo Z_c). Como promedios aritméticos y T_c como un promedio pesado con ρ , de acuerdo a la Ec. 6).

En lo que se refiere a la zona de interfase, el método contempla dos posibles alternativas de cálculo. La primera es considerar la perturbación restringida a la zona de interfase y caracterizarla con K_T^* y K_S^* . La segunda es suponer que también llega alguna perturbación al elemento de gradiente inmediato superior a la capa y asignar a este punto: $K_T^0 = (K_T^* + K_T)/2$ y $K_S^0 = (K_S^* + K_S)/2$, como se indica en la Fig. 5.

Este método de cálculo da origen a un programa fortran, que reproduce un día de experiencia en una hora de tiempo de micro-computadora (pDp 11/03).

$$\frac{\partial S}{\partial Z}(h, t) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial Z}(0, t) = 0$$

$$0 \leq Z \leq Z_c \quad S(Z, t) = S_c(t)$$

$$0 \leq Z \leq Z_c \quad T(Z, t) = T_c(t)$$

6

d) Condición de estabilidad

Las concentraciones p y S están vinculadas a la densidad por una relación de la forma:

$$F(p, S, \rho) = 0 \quad \text{para } T = \text{cte}$$

Donde la densidad es función de p y T por lo tanto:

$$p = p(Z, t), \quad T = T(Z, t)$$

$$\rho(T, p) = \rho(T(Z, t), p(Z, t)) = \rho(Z, t)$$

La condición de desestabilización es estática, en la zona de la interfase se puede escribir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial Z} /_{Z=Z_c} \quad \text{ó} \quad \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} /_{Z=Z_c} + \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial Z} /_{Z=Z_c} \geq 0$$

Es sabido que el proceso de desestabilización no es puramente estático sino que intervienen diversos fenómenos dinámicos. Aquí se introduce una primera hipótesis fenomenológica admitiendo que ellos son tenidos en cuenta agregando una constante $V \neq 1$ en la ecuación anterior:

$$V \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} /_{Z=Z_c} + \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial Z} /_{Z=Z_c} \geq 0 \quad 7$$

V deberá ser ajustada por comparación con los resultados experimentales.

e) La desestabilización del gradiente produce en la zona de interfase un fenómeno turbulento que cambia el proceso de difusión térmica y másica. Aquí se introduce la segunda hipótesis admitiendo que dicho cambio puede ser adecuadamente representado adoptando valores de K_T y K_S mayores que los correspondientes a los de los procesos moleculares, estos nuevos valores se llamarán K_T^* y K_S^* . El espesor de la interfase constituye un tercer parámetro ajustable.

6. RESULTADOS

Se ha trabajado sobre los datos de la experiencia 1. Con $\Delta Z = 0,008$ m; $h = 0,40$ m; $Q_e = 32$ watt; duración de la experiencia 6 días; intervalo de iteración 3 minutos; $T_a = 19,3$ °C. Se ha observado que si en la Ec. 7) se consideran $V = 1$, lo que reduce la Ec. 7) a la condición de desestabilización estática, el modelo computacional no reproduce ni el arranque ni el crecimiento de la capa convectiva. Se ha observado también que si se toman $K_T^* = K_T$ y $K_S^* = K_S$ el ajuste entre el cálculo y las medidas no es bueno.

Los mejores ajustes se han obtenido con los siguientes valores:

a) Alternativa I: perturbación en la interfase:

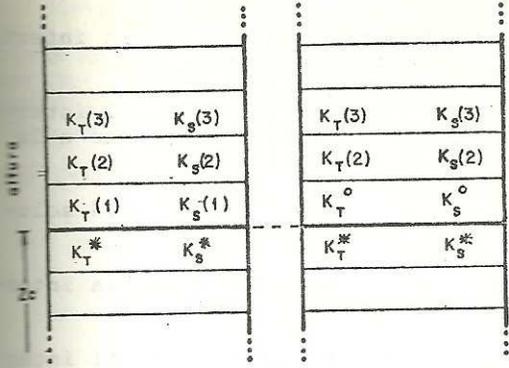


Figura 5 - Las dos alternativas de la perturbación en la zona de interfase.

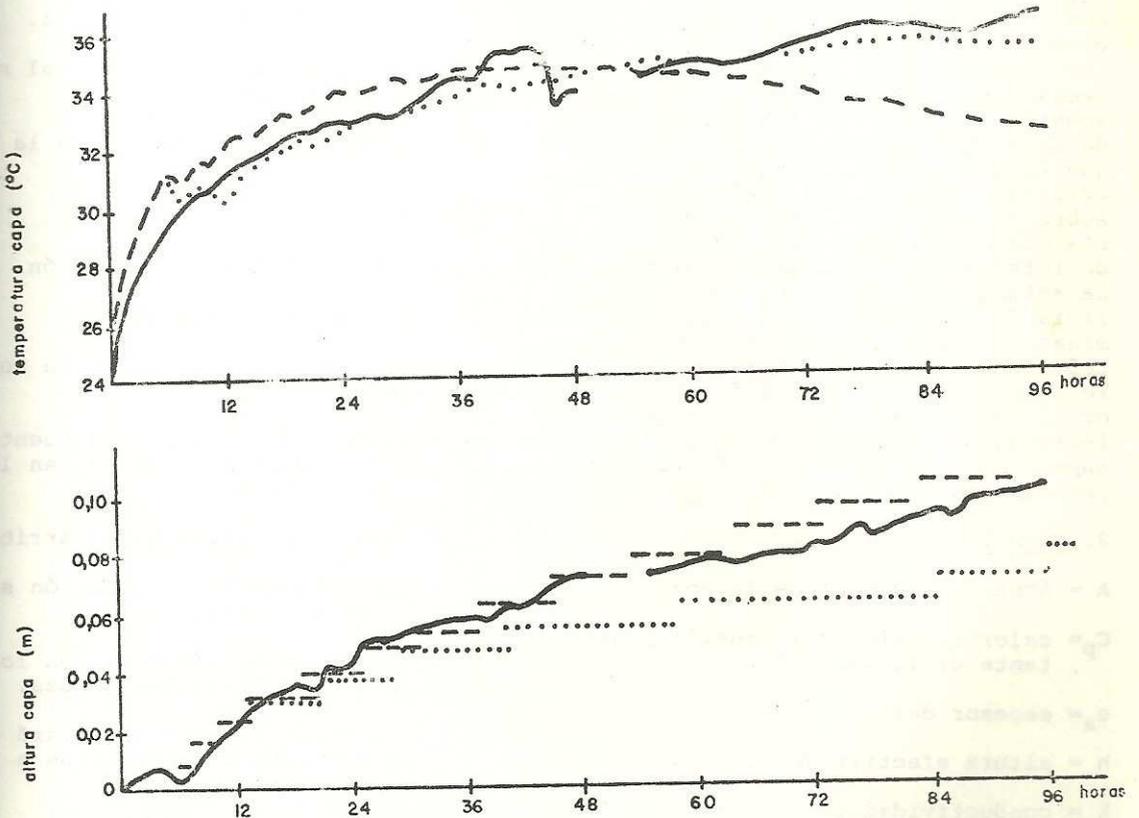


Figura 6 - Resultados del modelo fenomenológico.

- medidas experimentales
- alternativa I
- · - · - alternativa II

$$K_T^* = 0,1299 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{S}$$

$$K_S^* = 0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{S}$$

$$V = 1,088$$

b) Alternativa II: perturbación extendida al elemento inmediato:

$$K_T^* = 0,156 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{S}$$

$$K_S^* = 0,747 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{S}$$

$$V = 1,1$$

En la región de trabajo, $K_T = 0,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{S}$ y $K_S = (0,16 \text{ a } 0,19) \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{S}$.

El resultado de ambos ajustes para T_c y Z_c se muestran en la Fig. 6.

7. CONCLUSIONES

El acuerdo entre los resultados teóricos y experimentales logrados hasta el momento es razonablemente bueno por lo que se piensa que el modelo con algunos ligeros cambios será adecuado para la predicción del comportamiento de la capa en distintos sistemas prácticos. El hecho de que el acuerdo se obtenga con K_T^* del orden de K_T y K_S^* entre 4 y 10 veces mayor que K_S indica que el fenómeno que se origina en la interfase altera por sobre todo el flujo de masa y bastaría con dos parámetros K_S^* y espesor de interfase para caracterizarlo. En la actualidad se prosigue con el análisis del proceso tratando de determinar la existencia de relaciones teóricas o experimentales que permitan reducir a uno estos parámetros. Por otro lado se analizará el modelo con incremento de altura menores, lo que supone mayores tiempo de cálculo y mayor capacidad de máquina.

8. NOTACION

A = área transversal de la poza.

C_p = calor específico a presión constante de la solución.

e_a = espesor del aislante.

h = altura efectiva de la poza.

k = conductividad térmica de la solución.

k_a = conductividad térmica del aislante.

K_S = difusividad salina de la solución.

K_S^* = difusividad salina en la interfase capa-gradiente.

K_S^o = difusividad salina en el intervalo de gradiente inmediato a la capa convectiva.

K_T = difusividad térmica de la solución.

K_T^* = difusividad térmica en la interfase capa-gradiente.

K_T^o = difusividad térmica en el intervalo de gradiente inmediato a la capa convectiva.

$l \times 4$ = perímetro de la poza.

p = concentración en Kg de sal sobre Kg de agua.

Q = potencia de unidad de área, entregada a la solución.

Q_e = potencia eléctrica medida.

S = concentración en Kg de sal sobre m^3 de solución.

S_o = concentración inicial de la solución.

t = tiempo.

T = temperatura de la solución.

T_a = temperatura ambiente.

T_o = temperatura inicial de la solución.

V = parámetro que tiene en cuenta los fenómenos dinámicos en la desestabilización.

Z = altura, positiva hacia arriba.

ρ = densidad en Kg de solución sobre m^3 de solución.

ΔZ = altura de un intervalo en los que se ha dividido la poza.

Nota: el subíndice "c" indicará que la magnitud está referida a la capa convectiva.

9. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Plan Nacional de Energías No Convencionales (SECYT).

10. REFERENCIAS

(1) Mangussi, J., Lesino, G., Saravia, L. "Formación de capas convectivas en pozas solares de NaCl". Actas de la 5a. Reunión de Trabajo de Energía Solar de la ASADES. Córdoba. Pág. 167 (1979).

(2) International Critical Tables.