

SISTEMA DE MANTENIMIENTO DEL GRADIENTE SALINO PARA POZAS SOLARES

Judith Franco y Luis Saravia

INENCO#, Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177, 4400 Salta

Resumen

El método de flujo descendente para el mantenimiento de pozas solares requiere un sistema para evaporar agua y reconcentrar la solución salina del fondo de la poza.

En este trabajo se presentan los estudios realizados de un sistema evaporador que utiliza una torre rellena con piedra, con flujos a contracorriente de la solución caliente y aire en condiciones ambientales. Se realizó un modelo computacional para poder predecir su funcionamiento y se construyó un prototipo experimental para estudiar su comportamiento real y ajustar el modelo teórico.

1. Introducción

Las pozas solares son colectores acumuladores de energía solar. La radiación que atraviesa la superficie llega hasta el fondo (Ref. 1,2) y calienta la solución. Para evitar la convección se crea un gradiente de densidad, positivo hacia abajo, mediante un gradiente de concentración salina. Debido a este gradiente la sal se difunde hacia arriba tendiendo a destruir el gradiente de concentración.

Se han propuesto varios métodos para solucionar el problema. El más sencillo consiste en el agregado de sal en el fondo y el lavado de la superficie. Sus inconvenientes son el consumo de sal y la contaminación salina producida por el agua de lavado superficial. Tabor (Ref. 3) propuso un método alternativo llamado método de flujo descendente ("falling pond") que consiste en extraer solución del fondo de la zona de gradiente, reconcentrar la solución evaporando agua y

devolverla a la zona de donde se la ha extraído, de esta manera se establece una velocidad hacia abajo en la masa de la poza, cuando esta velocidad iguala a la velocidad de difusión de la sal, que es hacia arriba, el flujo neto de sal es cero y no es necesario agregar más sal en el fondo de la poza para mantener el gradiente. Se debe agregar agua pura o de baja concentración salina en la superficie de la poza para mantener el gradiente de concentración constante.

Existen varios métodos para producir la evaporación del agua a partir de la solución. En este trabajo se presenta algunos estudios iniciales realizados con un método alternativo de bajo costo y tecnología sencilla, que utiliza una torre rellena con piedra, con flujos a contracorriente de la solución caliente y aire en condiciones ambientales para producir la evaporación del agua de la solución y su reconcentración.

2. Cantidad de agua a evaporar en una poza

La velocidad que se le debe aplicar a la masa del líquido de la poza, teniendo en cuenta la estabilidad del gradiente, fue obtenida por Wang y Akbarzadeh (Ref. 4). Esta velocidad es una función del espesor de la zona de gradiente, la difusión salina y los gradientes térmicos y salino. A título de ejemplo es de apreciar que se obtiene una velocidad de 0,0003 m/día para una concentración en la superficie de 60 kg/m³, un espesor del gradiente de 1 m, una difusividad salina de 0.0002 m²/día y un gradiente de temperatura en la superficie de 200°C/m. Para obtener esta velocidad hay que extraer de la solución salina del fondo de la poza 0,3 litros de agua pura por cada m² o sea 300 lt por día

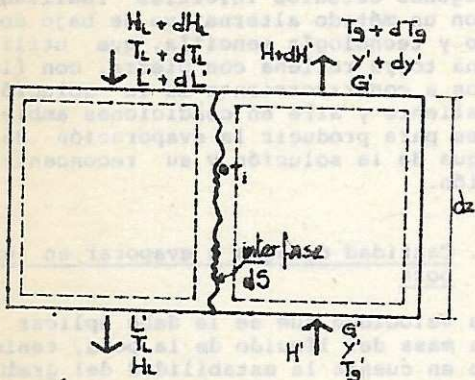
cada 1000 m² de poza.

Debido a la evaporación que ocurre en la superficie hay que agregar más agua de baja concentración salina a la superficie de la poza que la cantidad extraída del fondo.

3. Estudio teórico y modelo computacional

Las torres de relleno, se utilizan para el contacto continuo del líquido y del gas, y son columnas verticales que se han llenado con elementos de superficie grande. El líquido se distribuye sobre éstos y escurre hacia abajo a través del lecho, de tal forma que expone una gran superficie de contacto con el gas que asciende por la torre. El líquido se carga por la parte superior del material de relleno mediante un distribuidor y el aire se introduce por debajo del enrejado que sostiene el relleno.

Si suponemos que la torre opera en régimen estacionario y está aislada térmicamente, no hay pérdidas de calor al exterior. Consideremos un elemento diferencial de la torre de altura dz , como se ilustra en la Fig. 1.



En este elemento son diferenciales todos los cambios de temperatura, humedad, etc. La superficie interfacial de la sección es dS . Si a es la relación superficial interfacial específica ca/volumen empacado; entonces $dS = a \cdot dz$ ya que dz es el volumen de empaque por sección transversal unitaria.

Un balance total de masa nos da:

$$L' + dL' - L' = G' (Y' + dY' - Y')$$

$$dL' = G' \cdot dY' \quad (1)$$

La velocidad de transferencia de masa, que es el flujo de masa por unidad de sección transversal de la torre:

$$Na \cdot Ma \cdot a_m \cdot dz = -G' \cdot dY' = \frac{1 - \bar{P}}{1 - \bar{P} \cdot a_i / P_t} \cdot a_m \cdot dz \quad (2)$$

La velocidad de transferencia del calor sensible, como flujo de energía por área de la sección transversal.

Aire:

$$q_g \cdot a_h \cdot dz = \frac{Na \cdot Ma \cdot Ca}{1 - \exp(-Na \cdot Ma \cdot Ca / hg)} \cdot (T_g - T_i) \cdot a_h \cdot dz = h'g \cdot a_h (T_g - T_i) \cdot dz \quad (3)$$

$$\text{Líquido: } q_L \cdot a_h \cdot dz = h_L \cdot a_h (T_i - T_L) \cdot dz \quad (4)$$

Si hacemos una serie de balances de energía sobre los distintos entornos, podemos encontrar las ecuaciones fundamentales de operación de la torre.

Entorno I

Flujo de entalpía de entrada - Flujo de salida = velocidad de transferencia de calor

$$G' \cdot H' - G' (H' + dH') + G' \cdot dY' [Ca(T_g - T_0) + \lambda_0] = h'g \cdot a_h (T_g - T_i) \cdot dz \quad (5)$$

el tercer término es la entalpía del vapor transferido.

$$H' = C_s (T_g - T_0) + Y' \lambda_0 \quad (6)$$

como

$$dH' = C_g \cdot dT_g + Y' [Ca \cdot dT_g + \lambda_0] \quad (7)$$

$$C_s = C_g + Y' C_a = \text{calor húmedo} \quad (8)$$

Reemplazando dH' en la ecuación anterior se tiene

$$-G' C_s \cdot dT_g = h'g \cdot a_h (T_g - T_i) \cdot dz \quad (9)$$

Entorno II

Flujo de entalpía de salida = Flujo de entrada + rapidez de transferencia de calor

$$L' C_{a,l} (T_1 - T_0) = (L' + dL') C_{a,l} (T_1 + dT_1 - T_0) - G' dy' C_{a,l} (T_1 - T_0) + h_1 a_h (T_1 - T_1) dz \quad (10)$$

El segundo término de la derecha es la entalpía del agua transferida que ahora está en estado líquido. Sustituyendo por la ecuación de balance de masa e ignorando las diferenciales de 2do. orden se obtiene:

$$L' C_{a,l} dT_1 = (G' C_{a,l} dy' - h_1 a_h dz) (T_1 - T_1) \quad (11)$$

Entorno III

Flujo de entalpía de entrada = Flujo de salida (operación adiabática)

$$G' H' + (L' + dL') C_{a,l} (T_1 + dT_1 - T_0) = L' C_{a,l} (T_1 - T_0) + G' (H' + dH') \quad (12)$$

Sustituyendo la ecuación (1) y dH' e ignorando las diferenciales de 2do. orden.

$$L' C_{a,l} dT_1 = G' \left\{ C_s dT_g + \left[C_a (T_g - T_0) - C_{a,l} (T_1 - T_0) + \lambda_o \right] dy' \right\} \quad (13)$$

Igualando el lado derecho de las ecuaciones 11 y 13

$$T_1 - T_1 + G' \left\{ \frac{C_s (dT_g/dz) + [C_a T_g - C_{a,l} T_1 + (C_{a,l} - C_a) T_0 + \lambda_o] dy'/dz}{G' C_{a,l} (dy'/dz) - h_1 a_h} \right\} \quad (14)$$

esta ecuación nos da la temperatura de la interfase en función de las variaciones de la temperatura del aire y la humedad con la coordenada vertical z .

El gradiente de temperatura del aire se lo obtiene de la ecuación (9).

$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{h' g a_h}{G' C_s} (T_g - T_1) \quad (15)$$

Y $h' g a_h$ de la ecuación (3)

$$h' g a_h = \frac{N_a M_a C_a a_m}{1 - \exp(N_a M_a C_a a_m / h' g a_m)} \quad (16)$$

Si suponemos que las áreas a_h y a_m son iguales (esta suposición es muy

común ya que es muy difícil encontrar esas áreas por separado).

$$h' g a_h = \frac{N_a M_a C_a a_m}{1 - \exp(N_a M_a C_a a_m / h' g a_m)} \quad (17)$$

El gradiente de humedad es

$$\frac{dy'}{dz} = \frac{N_a M_a a_m}{G'} = \frac{M_a F_g \ln \frac{1 - \bar{P}_{a,i}/P_t}{1 - \bar{P}_{a,g}/P_t} \cdot a_m}{G'} \quad (18)$$

quedando

$$h' g a_h \approx \frac{G' C_a (dy'/dz)}{1 - \exp(G' C_a (dy'/dz) / h' g a_h)} \quad (19)$$

Con estas ecuaciones se pueden encontrar los puntos de operación de la torre, conociéndose los coeficientes de transferencia de masa y calor para el tipo de relleno.

El procedimiento es el siguiente: Si dividimos la torre en partes, cada partición con altura Δz y conociendo las condiciones iniciales de la torre, se puede calcular la temperatura de la interfase para esa diferencial, se conocen entonces las variaciones de temperatura del aire y de la humedad y por último calculamos las condiciones del nivel z , este procedimiento se repite hasta llegar a la parte superior de la torre.

4. Prototipo y resultados experimentales

El sistema de ensayo de la torre, Fig. 2, consiste en un cilindro de 30 cm de diámetro y 1 m de altura de chapa de plástico transparente reforzado con fibra de vidrio que está soportado en una base cilíndrica de chapa de igual diámetro y 40 cm de altura, la parte superior de la base tiene un enrejado que soporta el relleno de piedra de 80 cm de altura, y en la inferior se encuentra la salida de agua. La entrada de aire está también en la base cilíndrica. El distribuidor de agua se encuentra a unos 10 cm por encima de la piedra.

Un tanque calentado eléctricamente con tiene el líquido que simula la solución del fondo de la poza. Una bomba hace circular dicha solución en la torre. Un ventilador produce el flujo de aire a través de la torre. Se midieron flujo de agua, flujo de aire, temperaturas de aire a lo largo de la torre y temperaturas de entrada y salida para el agua y el aire.

Con los valores medidos se pudieron ob

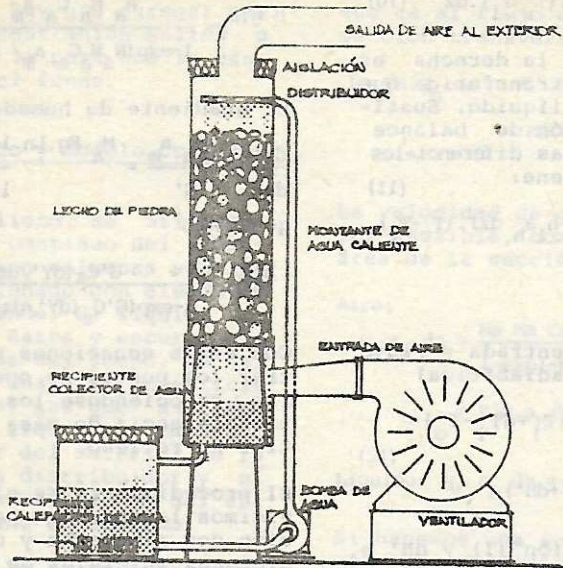


FIG 2

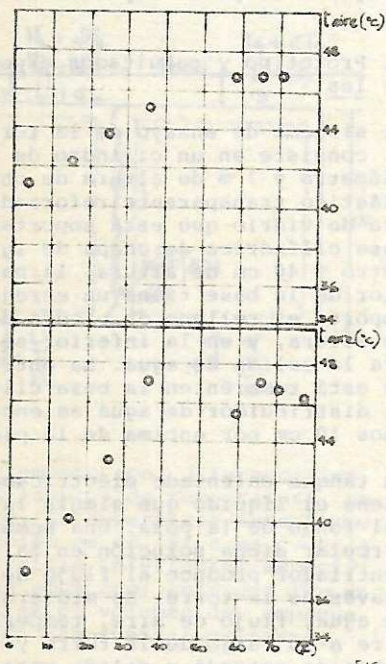
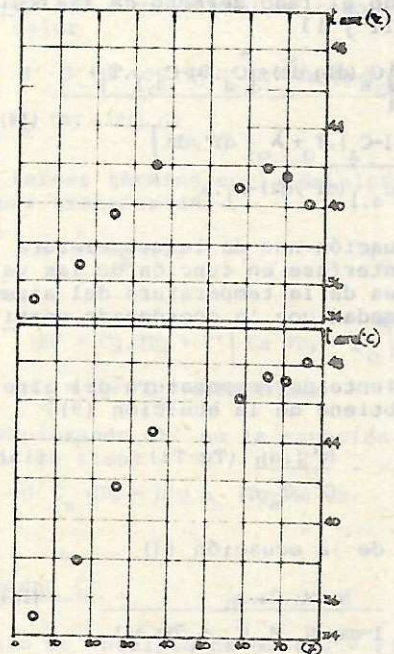


FIG 3



tener los coeficientes de transferencia de masa y calor para el relleno de piedra y ajustar luego el modelo teórico.

En las gráficas de la Fig. 3 (valores medidos) podemos observar que las temperaturas del aire en la parte superior de la torre son más bajas que los que se podría esperar, esto se debe a una mala distribución del líquido en esta zona. Se observa además que a partir de los 60 cm de altura la curva T-Z permanece constante, esto se debe a que el aire se satura a esta altura y la torre está sobredimensionada para esos valores de flujo de aire. Cuando se utilizaron flujos de aire más altos esto no sucedió.

La cantidad de agua evaporada por segundo es:

Agua evaporada por unidad de tiempo =

$$= G'(Y'_{\text{final}} - Y'_{\text{inicial}})$$

$$\approx 0,03 \text{ kg aire/seg} (0,07 - 0,03) \text{ kg agua/kg aire}$$

$$\approx 0,0012 \text{ kg agua/seg} = 1,2 \text{ gr/seg.}$$

Si la torre funcionara continuamente se evaporarían alrededor de 100 lts de agua/día.

Los coeficientes de transferencia que se obtuvieron, ajustando las curvas experimentales a los valores teóricos son:

$$F_g.a \quad 0,07 \text{ k mol/m}^3 \cdot \text{seg}$$

$$h_g.a \quad 5000 \text{ w/m}^3 \cdot \text{K}$$

$$h_l.a \quad 500000 \text{ w/m}^3 \cdot \text{K}$$

Estos coeficientes son solo una primera aproximación a los valores reales debido a que en el método usado para determinarlos se cometen errores grandes que es necesario disminuir.

Las fuentes de error son:

- 1 - No se puede determinar con precisión la temperatura del aire de entrada, así como su humedad.
- 2 - Las mediciones de los perfiles de temperatura se realizan tomando la temperatura del aire cerca de la pared.
Al no estar ésta perfectamente aislada del exterior influye en la medición.

5. Conclusiones

Una torre del tipo propuesto en este trabajo, rellena con piedras, ha resultado ser efectiva para la evaporación, no requiere de alta tecnología para su construcción y es de bajo costo.

Las experiencias aquí detalladas han permitido obtener datos primarios para una modelización teórica y experimental que den lugar a una puesta a punto del método.

Un aspecto importante es el consumo de energía eléctrica por la bomba y ventilador. Ellos no han podido ser determinados con cuidado en esta etapa ya que dichos elementos no fueron comprados específicamente para el ensayo y no estaban optimizados. Las piedras causan una pérdida de carga grande, lo que podría evitarse usando anillos especiales para relleno, logrando también una mejor superficie de intercambio. Estos anillos son de elevado costo y la elección final dependerá de un análisis económico detallado.

Como un aspecto secundario es de indicar que el vapor que sale de la torre, puede utilizarse para obtener agua pura condensándolo cuando sale de ésta. En zonas donde el agua es salobre, se podría utilizar este tipo de sistema para obtener agua potable.

6. Nomenclatura

- a Superficie interfacial específica (L^2/L^3)
- a_m, a_h Superficie interfacial específica para la transferencia de masa y de calor respectivamente (L^2/L^3)
- C Capacidad calorífica (FL/MT)
- F Coeficiente de transferencia de masa ($\text{mol}/L^2 \text{ t}$)
- G Velocidad másica superficial del aire seco ($M/L^2 \text{ t}$)
- h Coeficiente de transferencia de calor ($FL/L^2 \text{ T t}$)
- h' Coeficiente de transferencia de calor corregido para la transferencia de masa ($FL/L^2 \text{ T t}$)
- L' Velocidad másica superficial del líquido ($M/L^2 \text{ t}$)
- M Peso molecular (M/mol)
- N Flujo de transferencia de masa ($\text{mol}/L^2 \text{ t}$)
- \bar{P} Presión parcial del vapor (F/L^2)
- P_t Presión total (F/L^2)
- q Flujo de transferencia de calor sensible ($FL/L^2 \text{ t}$)

- S Superficie interfacial (L²)
 T Temperatura (T)
 Y' Humedad absoluta, masa vapor/masa aire seco (M/M)
 Z Altura (L)

Los subíndices 0, 1, g, i, indican: referencia, agua, aire, interfase y líquido respectivamente.

Referencias

1. "Nonconvective Salt-Gradient Solar Ponds"
 Nielsen, Carl E., Solar Energy Technology Handbook, W.Dickinson, P. Cheremisinoff; part A, Cap.11 (1979).
2. "Nonconvective Solar Ponds"
 Tabor, H., Weinberger, Z., Solar Energy Handbook, F. Kreider and F. Kreith; Mc Graw-Hill, Cap. 10 (1981).
3. "Solar Pond"
 Tabor, H. Science Journal, pp. 66-71, June (1966).
4. "A Further Study on the Theory of Falling Pond"
 Wang, Y., Adbarzadeh, A., Dep.of Mechanical Engineering Univ. Melbourne, Australia, para publicar en I.S.E.S. Journal.