

CALCULO TERMICO DE POZAS SOLARES DE PEQUENO O MEDIANO TAMAÑO PARA LA INDUSTRIA MINERA.

G. Lesino* y L. Saravia**

INENCO*,
Universidad Nacional de Salta,
Buenos Aires 177,
4400, Salta, Argentina.

RESUMEN

En el pasado se han propuesto varias aplicaciones de las pozas solares en la minería, tales como la producción de sulfato de sodio o de ácido bórico. En algunas de ellas se usan pozas de tamaño pequeño y con soluciones coloreadas. Con el fin de diseñar la poza a usar en la planta minera es necesario realizar una evaluación térmica de las mismas. El cálculo de variables de interés tales como las dimensiones, concentraciones y temperaturas requiere cálculos térmicos que consideren en forma interactiva las pérdidas por el terreno, la acumulación en el mismo y la consideración de la dependencia de la absortividad con la longitud de onda de la radiación. En este trabajo se presenta un modelo térmico bidimensional resuelto mediante un desarrollo de Fourier donde se incluyen dichos efectos.

INTRODUCCION

Las pozas solares han sido utilizadas en la industria minera, por ej., en la producción de sulfato de sodio(1,2). Se han propuesto otras aplicaciones, por ej., la producción de ácido bórico, cobre y cloruro de potasio(3,4). Estas aplicaciones muestran dos aspectos particulares. Por un lado, resulta económicamente factible usar pozas de tamaño pequeño. Por otro, en algunos casos se utilizan soluciones coloreadas, como las de ácido sulfúrico industrial o de sulfato de cobre. Para diseñar una planta y analizar los aspectos económicos de la misma, se hace necesario realizar estimaciones del área de poza a usar, altura de las distintas capas y concentraciones. Estos parámetros están determinados por la temperatura deseada, la fluctuación anual de temperatura y la energía a extraer para cada lugar.

La determinación de dichas variables requiere cálculos térmicos que tomen en cuenta las pérdidas y acumulación en el suelo y la absorción selectiva de las soluciones usadas.

En el presente trabajo un modelo térmico bidimensional, incluyendo el suelo, es resuelto mediante un desarrollo en serie de Fourier. El balance térmico para cada frecuencia es planteado con un método de diferencias finitas, usando programas disponibles para calculo matricial. El programa puede funcionar en una computadora PC en un tiempo razonable. El espectro

Investigador del CONICET.

* Instituto UNSa-CONICET

solar se divide en bandas de igual energía cada una, 5% del total, para permitir una descripción detallada de la absorción de la solución como función de la longitud de onda.

También se ha preparado un modelo térmico unidimensional que si bien considera la acumulación en el suelo no puede tener en cuenta las pérdidas laterales por el mismo. Este programa es muy rápido y permite cubrir las etapas de prediseño con un buen grado de interacción.

Se calculan ejemplos de pozas de tamaño pequeño o mediano, con distintas configuraciones geométricas y aislaciones, con soluciones de sulfato de cobre y de ácido sulfúrico. Se usan datos de absorción provenientes de medidas espectrofotométricas.

ABSORCION DE LA RADIACION

En la industria minera en países como Chile y Argentina, la producción de energía térmica con pozas solares puede tener un costo menor que la generada por métodos convencionales si las soluciones usadas en el tratamiento del mineral son calentadas directamente, evitando el uso de intercambiadores de calor. Por ej., se ha mostrado que en el caso de la producción de sulfato de sodio el calentamiento directo con pozas de 400 m² de área tiene una inversión inicial menor que la de los procesos convencionales. Muchas de estas soluciones son coloreadas por efecto de la propia sal utilizada, y es necesario considerar su efecto en el proceso de absorción de la radiación solar.

Usualmente, las pozas solares de cloruro de sodio se calculan con un modelo de absorción de energía por parte de la solución utilizada que contiene cuatro términos exponenciales. Para las soluciones coloreadas se divide el espectro solar en 20 bandas, cada una de las cuales contiene el 5% del total de la energía radiante. Para cada banda se plantea un modelo exponencial con el coeficiente de absorción de la solución correspondiente a la longitud de onda media de la banda.

El coeficiente de absorción será una media ponderada en peso de los coeficientes que se asignan al agua pura y al soluto. Para obtener el coeficiente del soluto, se mide el de la solución y se le resta el del agua pura. Se supone que el coeficiente tendrá una dependencia lineal con la concentración, la que a su vez depende linealmente de la profundidad de la poza. La forma del coeficiente total es :

$$\mu = e_w \cdot c_w + e \cdot [c_{min} + \delta c \cdot (z - l_{ca}) / l_{no}] \quad (1)$$

donde e_w es la derivada del coeficiente de absorción del agua respecto a su concentración, c_w es la concentración de agua en la solución, e es la derivada de la absorción del soluto con respecto a la concentración c , c_{min} es la concentración en el nivel superior de la capa no convectiva de la poza, δc es el salto de concentración a través de la misma, z es la profundidad de la poza medida a partir de su superficie, l_{no} es el espesor de la capa no convectiva y l_{ca} es el espesor de la capa convectiva superior. Se ha supuesto que la concentración de soluto varía en forma lineal a partir del comienzo de la capa no convectiva. Las concentraciones suelen expresarse en moles por litro. Se supone que las derivadas de la absorción son independientes de concentración y temperatura en cada banda de longitud de onda.

La absorción de la potencia I de radiación transmitida por metro cuadrado a una profundidad z en una banda de longitud de onda está regida por la siguiente ecuación :

$$dI = -\mu \cdot I \cdot dz \quad \{2\}$$

Al integrar la ecuación {2} aparece una dependencia cuadrática debido a la variación lineal de la concentración con la profundidad :

$$I = I_0 \cdot \exp[(e_w \cdot c_w + e_{cmin}) \cdot z + e_{\delta c} \cdot (z - l_{c_{\infty}})^2 / (2 \cdot l_{no})] \quad \{3\}$$

La radiación solar total se obtiene sumando sobre las 20 bandas de longitudes de onda teniendo en cuenta la distribución espectral de energía, la que dependerá de la latitud y altura del lugar.

CALCULOS TERMICOS

El cálculo de los perfiles de temperatura en la poza solar construida con una solución coloreada se realiza numéricamente para el estado estacionario y para el caso sinusoidal. Se han desarrollado dos programas que corren en un computador personal. El primero resuelve el problema en una poza unidimensional y toma en cuenta no sólo la solución coloreada sino también las pérdidas y acumulación en el suelo. El segundo es bidimensional y permite evaluar las pérdidas laterales en el suelo. Este requiere mayor tiempo de cálculo y se aconseja su uso en las últimas etapas de diseño para realizar un ajuste y verificación final.

En el modelo unidimensional se consideran cuatro zonas : la capa convectiva superior, la capa de gradiente, la capa convectiva inferior y el suelo. La zona de gradiente y el suelo se dividen en subcapas. El estado térmico es caracterizado por un vector de temperaturas T(j) correspondiente a las subcapas. Se definen dos resistencias térmicas para cada subcapa, TRU(j) y TRD(j), que la conectan a las subcapas superior e inferior. Cada subcapa en la zona de gradiente absorbe una potencia Q(j) de la radiación solar, la que se calcula como fue indicado en la sección anterior. El balance energético para cada subcapa es :

$$c_p(j) \cdot \rho_o(j) \cdot [dT(j)/dz] = TRU(j) \cdot [T(j-1) - T(j)] + TRD(j) \cdot [T(j+1) - T(j)] + Q(j) \quad \{4\}$$

donde el calor específico $c_p(j)$ y la densidad $\rho_o(j)$ varían de acuerdo a la posición dentro de la poza. En la capa convectiva inferior, Q(j) incluye el término de extracción, el que define la eficiencia global de la poza solar. La temperatura ambiente en la superficie y la de suelo en la profundidad, eventualmente la de la napa freática, determinan las condiciones de borde.

Se realiza un desarrollo en serie de Fourier de la ecuación, con una frecuencia circular fundamental w de un año. El estado estacionario y cada armónica se resuelven por separado. Las derivadas en el tiempo son reemplazadas por términos del tipo $i \cdot w \cdot T_j$, donde i es el número imaginario. Para cada frecuencia se obtiene un sistema de ecuaciones lineales complejas :

$$TRU(j) \cdot T(j-1) + [i \cdot w \cdot c_p(j) \cdot \rho_o(j) + TRU(j) + TRD(j)] \cdot T(j) + TRD(j) \cdot T(j+1) = Q(j) \quad \{5\}$$

El sistema se resuelve en el ámbito del programa MATLAB (5), que utiliza una programación matricial compacta y funciona con tiempos reducidos de cómputo. MATLAB es también un programa integral con recursos de graficación y un intérprete rápido donde los resultados pueden ser analizados interactivamente.

Los perfiles de la poza y el suelo se obtienen en el programa unidimensional en menos de un minuto. Los datos de entrada para el caso estacionario son la geometría de la poza, las propiedades físicas de los materiales, la radiación solar y la extracción de calor. Para el caso sinusoidal también se requieren la fase y amplitud de las distintas variables.

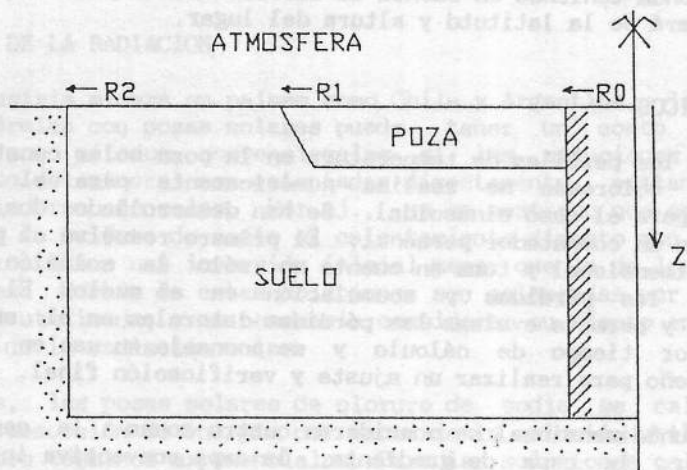


Fig. 1.- Corte de la poza, caso bidimensional.

En el caso bidimensional se utiliza una simetría cilíndrica que se muestra en corte en la Fig. 1. Al contemplarse el uso de un radio R_0 interno, que define una superficie adiabática, se pueden considerar aproximadamente casos de simetría no cilíndrica, eligiendo los radios R_1 y R_0 de manera que tanto la configuración experimental como la teórica tengan igual perímetro y área.

En este modelo se vuelve a dividir la poza en capas y subcapas con temperaturas $TP(j)$. El suelo se divide en rectángulos de temperatura $TS(k,j)$, determinados por los radios $r(k)$ y las profundidades $z(j)$. En la zona de la poza, las profundidades $z(j)$ en el suelo se corresponden con las usadas en aquella. El suelo se limita mediante un radio externo R_2 y una profundidad z_2 . El balance de calor para la poza es similar al usado en el modelo unidimensional, excepto por el hecho de que $Q(j)$ incluye las pérdidas laterales. En el piso se resuelve la ecuación del calor. Al usar un análisis armónico, la ecuación en el suelo para cada frecuencia y cada elemento contiene un término de la forma $i \cdot \omega \cdot TS(k,j)$ en forma similar a la ecuación (5). En la misma aparecen cuatro resistencias térmicas conectando el elemento con sus cuatro vecinos. El calor generado $Q(k,j)$ es diferente de cero únicamente en los elementos en contacto con la poza. Se imponen condiciones de temperatura constante en la superficie, el límite profundo y el lado externo, mientras que la pared interna de radio r_0 es adiabática. Se asume una distribución inicial de temperaturas, que para la poza corresponde al caso unidimensional. Se aplica un método iterativo

standard para resolver la ecuación del calor en el suelo. Típicamente se necesitan alrededor de 600 iteraciones en el suelo y 30 en la poza para obtener una convergencia razonable. Esto requiere unos 15 minutos en una PC-AT con coprocesador para el caso estacionario y 30 para el sinusoidal. Como resultados se obtienen la distribución de temperatura en la poza y suelo, así como el calor intercambiado entre ambos. Los resultados obtenidos para las pérdidas laterales en el caso bidimensional estacionario están de acuerdo con los resultados publicados por Hull(6).

EJEMPLOS

Los cálculos realizados para una poza de sulfato de cobre, que podría ser usada en el proceso de recuperación de cobre, se muestran en la Tabla I. El mismo resultado para una poza de ácido sulfúrico, a ser utilizada en la producción de ácido bórico, se muestran en la Tabla II. Se han utilizado valores de los coeficientes de absorción obtenidos en laboratorio por métodos espectrofotométricos. Se hicieron medidas para distintas concentraciones y se calcularon los valores de la derivada e para diferentes longitudes de onda. Se llevaron a cabo corridas de los programas con distintos valores de la eficiencia ϵ , que determina la extracción de calor en el fondo de la poza, el espesor l_{nc} de la capa no convectiva y el gradiente de concentración δc a través de dicha capa. El resultado es el salto de temperatura δT que se obtiene entre la superficie y el fondo de la poza. Se observa que, a diferencia de la poza calculada con agua pura, cuando se incrementa la zona de gradiente también se debe aumentar el salto de concentración δc con el fin de mantener la estabilidad hidrodinámica. En estos cálculos se ha supuesto una concentración de la capa superior igual a 0, una potencia solar media anual de 250 w/m², una conductividad térmica del suelo igual a 1 w/m²C y 15 metros de suelo debajo de la poza.

La solución de sulfato de cobre tiene un color azul profundo que da lugar a una fuerte absorción, por lo que sólo es posible usar pozas con capas convectivas de pequeño espesor y los saltos de temperatura obtenidos son pequeños, aunque son los requeridos para este tipo de proceso.

La solución de ácido sulfúrico tiene un color amarillo de menor absorción que en el caso del sulfato, por lo que se puede plantear una mayor eficiencia y obtener saltos mayores.

TABLA I : Cálculo de temperatura en el fondo de una poza con solución de sulfato de cobre.

ϵ , %	l_{nc} , m	δc , mol/l.	δT , °C
10	0.3	0.4	9.7
5	0.4	0.4	19.0
5	0.4	0.6	16.6
0	0.6	0.6	24.8

TABLA II : Cálculo de temperatura en el fondo de una poza con solución de ácido sulfúrico.

20	0.5	2.5	28.3
15	0.6	2.5	40
10	0.7	2.7	52.8

Para mostrar las posibilidades de cálculo y salida gráfica del programa desarrollado, se muestran algunos resultados correspondientes al estado estacionario y al primer término sinusoidal de una poza de cloruro de sodio. La Fig. 2 muestra un diagrama tridimensional de temperaturas en la poza y suelo para el caso estacionario. La fig. 3 muestra un diagrama polar de la amplitud y fase del primer término sinusoidal a lo largo de la poza y suelo, suponiendo una amplitud térmica de 5 C para la temperatura ambiente y 0 C para la temperatura en el suelo a gran profundidad.

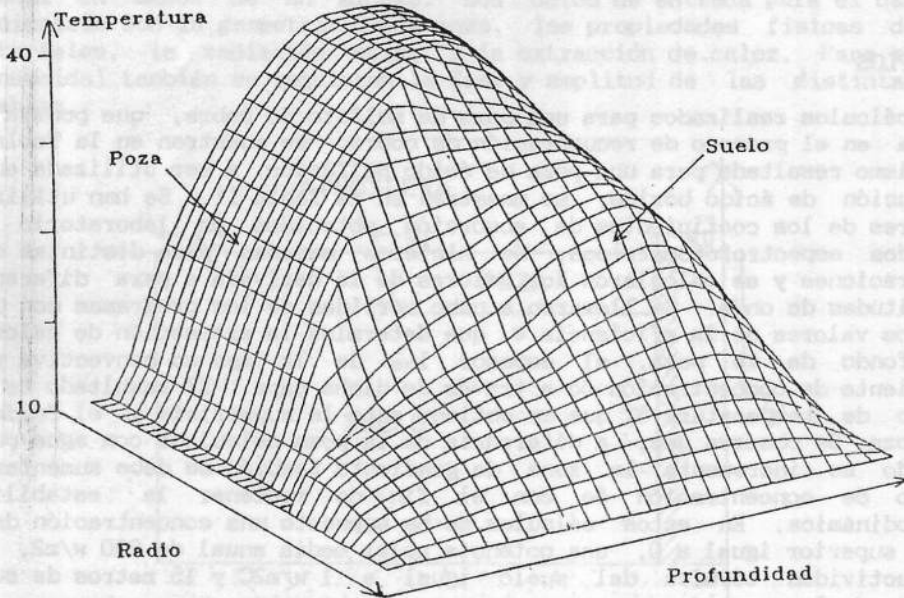


Fig.2 Diagrama tridimensional de temperaturas en la poza y suelo para el caso estacionario.

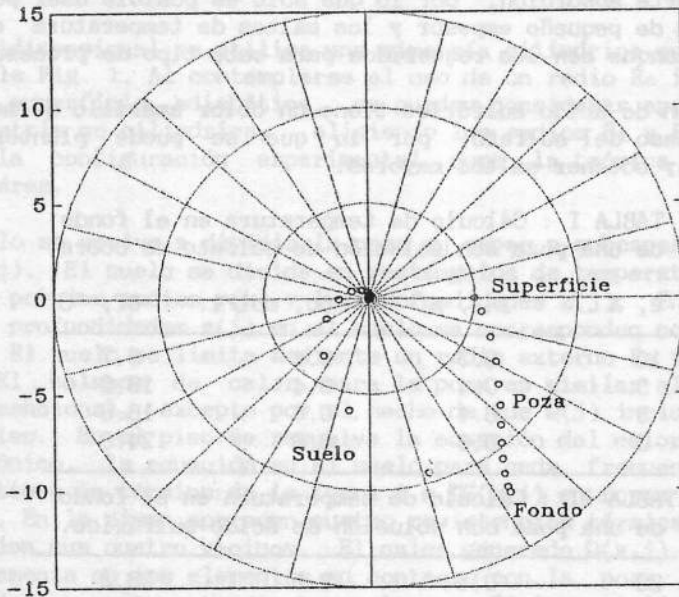


Fig.3. Diagrama polar de la variación de la amplitud y fase de la temperatura en la poza ante una excitación sinusoidal.

El uso de coeficientes de absorción medidos por métodos espectrofotométricos constituye una primer aproximación al fenómeno, ya que el mismo tiene un carácter mas complejo debido a la existencia de distintos procesos de absorción y dispersión de la radiación en el seno de la solución.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Irene Lomniczi y a la Lic. Analía Ilvento por las medidas espectrofotométricas.

REFERENCIAS

1. G. Lesino, J. Mangussi, L. Saravia, D. Galli y J. Riera. Incorporación de las pozas solares al proceso industrial de producción de sulfato de sodio. Actas de la VI Reunión de Trabajo de la ASADES, Argentina, 143-164 (1980).
2. G. Lesino, L. Saravia y G. Galli. International Seminar on Solar Pond Technology, Mexico (1987).
3. G. Lesino, L. Saravia y D. Galli. Las pozas solares como reactores químicos. Aplicación a la producción de ácido bórico. Actas de la VIII Reunión de Trabajo de la ASADES, Argentina, 173-178, (1983).
4. G. Lesino y L. Saravia. Solar ponds in hydrometallurgy and salt production. Aceptado para publicación en Solar Energy..
5. PC-MATLAB. Version 2.2. The Mat Works Inc., 158 Woodland St, Sherborn, MA 01770, USA.
6. J.R. Hull, K.V. Liu, W.T. Sha, J. Kamal and C.E. Nielsen. Dependence of ground heat loss upon solar pond size and perimeter insulation: calculated and experimental results. Solar Energy, Vol. 33, pp. 25-33, 1984.

Verificación y concentración de sales y minerales a partir de salinas o salmueras. Las pozas solares que ya se han utilizado para la producción de sal y electricidad (1), muestran grandes potencialidades en aplicaciones similares. Presentan una alta eficiencia energética y precisa compatibilidad con los equipos industriales. Este resulta en menores costos del producto final debido a ventajas de inversión y de funcionamiento más bajas.

Hasta el presente, la aplicación de pozas solares a la minería se ha realizado en la producción de sulfato de sodio (2, 3, 4). Se ha propuesto para la producción de ácido bórico (3, 5) y para la producción de potasio (6), y en la inyección de soluciones calientes en Georox Lake, EE.UU., (7). Se han solicitado dos patentes en los Estados Unidos sobre el uso de pozas para disolución y precipitación de sales y evaporación, aunque no se han documentado proyectos de demostración a este respecto (8, 9).

1 Investigador del CONICET

2 Instituto CONICET-Universidad Nacional de Salta