

## SENSOR DE RADIACION SOLAR PARA POZAS SOLARES: ESTUDIOS PRELIMINARES

R. Ashur, L. Saravia\* y C. Cadena\*\*

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

### 1. INTRODUCCION

En el funcionamiento de la poza resulta de fundamental importancia la distribución de radiación en función de su profundidad ya que la solución absorbe parcialmente la radiación incidente afectando la proporción de energía que llega al fondo y por tanto su eficiencia final. Para pozas con distinto tipo de sal y en cada región de uso es necesario analizar teórica y experimentalmente dicha distribución ya que es afectado por las propiedades ópticas de la sal y de los distintos tipos de suspensión que se produce de acuerdo a las características del medio que lo rodea (polvo, algas, etc.). Por otra parte es necesario controlar la transparencia de la poza durante su funcionamiento ya que el crecimiento de algas u otras suspensiones puede deteriorar su rendimiento si no se controla adecuadamente.

El uso de solarímetros convencionales de termopila (superficie negra bajo vidrio que se calienta con la radiación midiendo la elevación de temperatura) no resulta confiable en este caso por dos razones: a) la cubierta de vidrio da lugar a una interfase agua-aire que refleja parcialmente la radiación que atravesando el agua penetra en el aire o se desvía (actúa como lente) modificando sustancialmente la lectura del solarímetro y haciéndola muy susceptible al ángulo de incidencia y a las características ópticas de la solución; b) los cambios grandes de temperatura entre la superficie y el fondo afectan el funcionamiento del solarímetro cuya compensación de temperatura está diseñada para operar en el aire y es de rango limitado.

Se propone en este trabajo el estudio y desarrollo de un sensor que permita la medición de radiación bajo agua que, usando principios térmicos para la medición, evite los problemas ya enunciados.

### 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento de este sensor se basa en la medición diferencial de temperatura (fig. 1). El sensor se compone de una cubierta plástica maciza de forma esférica. Esta se encuentra cubierta de una pintura acrílica blanca que cumple la función de reflector difuso al interior. El sensor posee una ventana no pintada (corte plano sobre un meridiano) por donde penetra la radiación, reflejándose en la superficie blanca que funciona como esfera integradora de radiación. Finalmente ésta es captada por el detector térmico incrementando su temperatura por sobre la temperatura de la solución de la poza.

\* Investigador del CONICET

\*\* Profesional del CONICET

# Instituto UNSa.-CONICET

Es importante destacar que la cobertura de plástico, al ser macizo, evita las reflexiones que se producirían en una cavidad con aire. Por otra parte, brinda una buena aislación térmica entre el detector y el medio externo (solución), imprescindible para el funcionamiento de este instrumento.

El sensor 2, idéntico en forma y volumen al primer, se encuentra totalmente cubierto por el revestimiento blanco. Este segundo sensor provee una señal proporcional a la temperatura de la solución.

La señal a procesar surge de la diferencia de las salidas de los sensores 1 y 2. Esto permite independizarse de la temperatura de la solución de la poza, obteniéndose tan solo la señal debida al salto térmico del detector ocasionado por la radiación incidente. Esta señal obtenida debe sufrir un tratamiento para poder encontrar correspondencia con la radiación que la originó, en razón de la inercia térmica del instrumento que obliga a realizar un análisis en régimen transitorio.

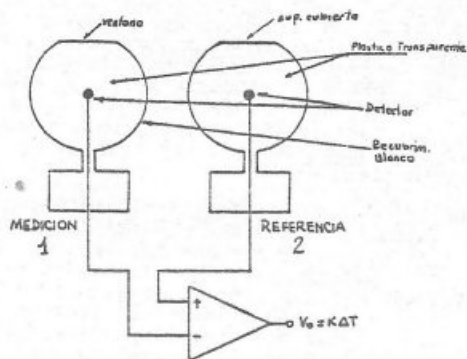


Fig. 1

### 3. EL SENSOR

#### 3.1. Cobertura plástica.

La función de esta cobertura transparente es la de aislar térmicamente al detector, permitiendo incrementar su temperatura por encima de la temperatura de la masa de líquido circundante. Por otra parte, tratándose de un sensor para sumergirse, se evita la interfase líquido-aire que existiría en los medidores convencionales que afectaría el camino de los rayos solares debido a la diferencia en los índices de refracción.

El material usado para la cobertura fue acrílico cristal. Este se provee en barras que se tornean con la forma del sensor. La superficie del sensor se cubre con pintura blanca que cumple la función de reflector difuso de la radiación que penetra por la ventana. Respecto a ésta, diremos que es un corte de la esfera (que no se pinta) que proporciona un área de colección determinada por los modelos teóricos estudiados.

#### 3.2. El Detector.

Como transductor de temperatura se usó un detector de precisión, de la serie LM 135. El mismo opera como un diodo zener cuya tensión de ruptura es directamente proporcional a su temperatura, con un coeficiente de 10 mV/K. El circuito para uso como medidor diferencial de temperatura se muestra en la figura 2. Como se puede apreciar, se trata de un amplificador diferencial con ganancia 10 que proporciona una salida de 100 mV/C. El potenciómetro P1 permite el ajuste de cero.

### 4. ESTUDIO DEL SENSOR

Se elaboró un modelo analítico y un modelo computacional del sensor.

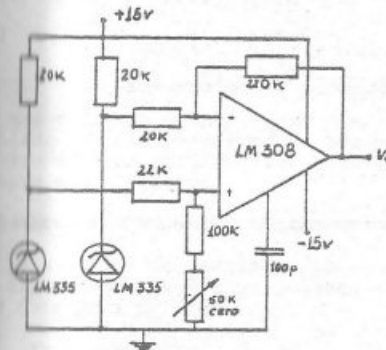


Fig. 2

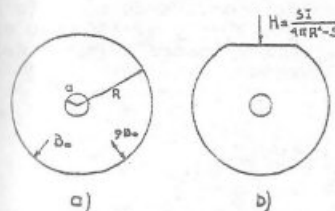


Fig. 3

#### 4.1. Modelo Analítico.

Se parte de la suposición de que la radiación ingresa por toda la superficie de la esfera como se esquematiza en la figura 3. Podemos plantear el balance de energía en el sensor como

$$H = Bo \left[ \frac{1}{\left(1 - \frac{S}{4\pi R^2}\right) \left(1 - \frac{\pi a^2}{2\pi R^2}\right)} \right] \quad (1)$$

p : coef. de ref. pared blanca  
s : superficie de la ventana  
Bo : radiación equivalente distribuidor  
H : rad. solar que ingresa al sensor  
a : radio del detector  
R : radio del sensor.

La potencia absorbida por el detector es, reemplazando (1) en (2)

$$W = (H + \rho Bo) (4\pi R^2 - S) \frac{\pi a^2}{2\pi R^2} \quad (2)$$

$$W = SI \frac{a^2}{2R^2} \left[ 1 + \frac{1}{\left(1 - \frac{S}{4\pi R^2}\right) \left(1 - \frac{a^2}{2R^2}\right) \rho - 1} \right] \quad (3)$$

(con I: radiación solar.)

Se puede plantear la ecuación de balance térmico del detector como

$$M \frac{dT}{dt} = W A - Qd \quad (4)$$

Cp: calor específico del detector  
M : masa del detector  
A : área del detector  
dT: diferencial de temperatura  
Qd: potencia perdida por el detector.

Previo a resolver esta ecuación diferencial es necesario determinar la expresión de Qd. Se parte para este cálculo de la ecuación que describe la variación de temperatura de una esfera inicialmente a una temperatura To en un medio a temperatura Ti en función del tiempo y de la distancia a su centro:

$$T - To = \frac{r_0}{r} (-To + Ti) \operatorname{erf} \frac{r - r_0}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (5)$$

r0: radio de la esfera  
α: difusividad térmica

El flujo de calor se obtiene entonces como

$$Qd = KA \frac{dT}{dr} = -KA \left\{ \frac{r_0}{r} (To - Ti) \operatorname{erf} \frac{r - r_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{r_0}{r} (To - Ti) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp \frac{-(r - r_0)^2}{4\alpha t} \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \right\} \quad (6)$$

Particularizando (6) para  $r = r_0$ :

$$Q_d = R A \frac{T_o - T_i}{\sqrt{\pi} \sqrt{t}} \quad (7)$$

Llevando ahora esta expresión a la ecuación (4) obtenemos

$$\frac{dT}{dt} + \frac{\beta}{2} \frac{T - T_i}{\sqrt{t}} - W_o = 0 \quad \beta = \frac{2 R A}{C_p M \sqrt{\pi a^2}} \quad \text{y} \quad W_o = \frac{W A}{M C_p} \quad (8)$$

La solución de esta ecuación diferencial considerando las condiciones iniciales  $t=0$   $T = T_i$  resulta

$$T - T_i = \frac{2 W_o}{\beta^2} \left\{ \exp(-\beta \sqrt{t}) + \beta \sqrt{t} - 1 \right\} \quad (9)$$

siendo esta la relación que caracteriza la modelo.

Ahora bien, se hace necesario extraer de esta respuesta información de la radiación incidente sobre el sensor. La fig. 6 muestra una gráfica de la diferencia de temperatura  $T - T_i$  en función de  $t$  dada por la ecuación (9) con valores apropiados de los parámetros. Puede en ella observarse que para tiempos mayores que 4 seg. ( $t =$ ) el término  $\exp(-\beta \sqrt{t})$  se hace despreciable frente al segundo y tercer término del segundo miembro, pudiéndose simplificar (9) como

$$T - T_i = \frac{2 W_o}{\beta^2} (\beta \sqrt{t} - 1) \quad (10)$$

que corresponde a una recta de pendiente  $m = \frac{2 W_o}{\beta}$

lo que permite evaluar la radiación incidente por ser un valor directamente proporcional a ella.

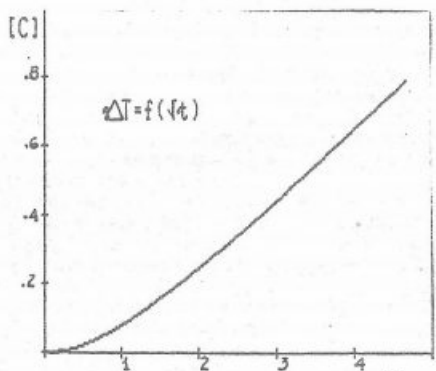


Fig. 4

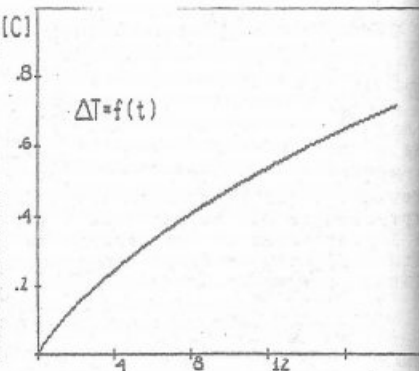


Fig. 5

Puede demostrarse también que la pendiente al origen de la respuesta en función de  $t$  (fig. 5) es

$$\left. \frac{d(T - T_i)}{dt} \right|_{t=0} = W_o = \frac{W A}{C_p M}$$

lo que también permitiría evaluar la radiación, pero se optó por lo explicado arriba en virtud de permitir una medición más correcta (mayor número de puntos) y evitar errores inherentes a la constante de tiempo propia del detector.

#### 4.2. Modelo Computacional

Se desarrolló un modelo utilizando el método de diferencias finitas. En la fig. 6 se observa un esquema del modelo. Considerando los incrementos de radio  $\Delta r$  como

$$\Delta r = \frac{b - a}{n}$$

b: radio de la cobertura plástica  
a: radio aproximado del sensor  
n: número de particiones

Se plantea el siguiente balance:

$$\rho 4 \pi r^2 \Delta r C_{pc} \Delta T = 4 \pi R \left( \frac{\Delta r}{2} + r \right)^2 \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r} + \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta r} \Delta t$$

0 i n

con  
 $\rho$ : densidad del plástico de cobert.  
 $C_{pc}$ : calor específico del plástico de cobertura.  
 $\Delta t$ : incrementos de tiempo  
 $T_i$ : temperatura en la partición i.

Fig. 6

de aquí:

$$\Delta t = \frac{R \Delta t}{\rho C_{pc} \Delta r^2} \left\{ \left( 1 + \frac{\Delta r}{2r} \right)^2 (T_{i+1} - T_i) + \left( 1 - \frac{\Delta r}{2r} \right)^2 (T_i - T_{i-1}) \right\}$$

Por otra parte para el detector se plantea:

$$m_x \rho_{px} \Delta T_a = 4 \pi a^2 \left\{ W_o \Delta t + R \frac{T_1 - T_a}{\Delta r} \right\}$$

con

$\Delta t_d$ : incremento de temperatura del detector  
 $T_a$ : temperatura del detector  
 $T_1$ : temperatura en la primera partición  
 $W_o$ : radiación que llega al detector  
 $k$ : coeficiente de conductividad térmica

Para este caso  $m_x$  y  $C_{px}$  son los valores de masa y calor específico del detector incluyendo la primera partición, esto es

$$m_x C_{px} = m_d C_{pd} + 4 \pi a^2 \Delta r \rho C_{pc}$$

con

$m_d$  = masa del detector,  $C_{pd}$  = calor específico.

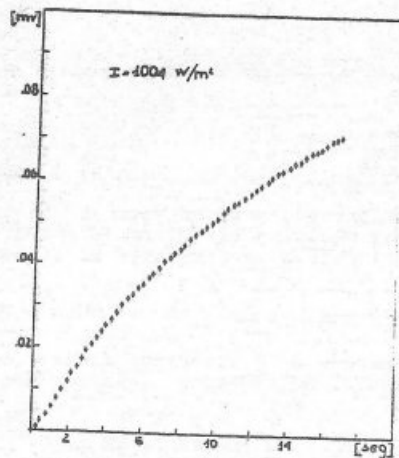


Fig. 9

### 5.1. Resultados de ensayos del sensor modificado.

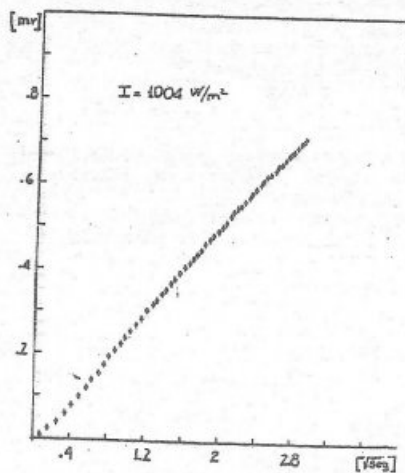


Fig. 10

la pendiente del segmento aproximadamente recto de la curva Respuesta -vs-Raíz de tiempo (figura 10) y con el se analizaron los ensayos realizados para distintos niveles de radiación. En todos los casos el segmento considerado contenía más de 20 valores y el coeficiente de correlación obtenido no fue inferior a 0.99.

Si bien no se realizaron estudios completos del comportamiento del dispositivo para distintos ángulos de incidencia de la radiación, se observó variaciones cuando el sensor no era completamente sombreado por el círculo adherido a la ventana. Esto motivó a suspender los ensayos para desarrollar un nuevo sensor cuya respuesta fuera independiente del ángulo de incidencia de la radiación.

El nuevo modelo presenta el detector desplazado. En este caso el detector no está incluido en el material plástico. Estos detalles se observan en el esquema de uno de los sensores de la fig. 12.

En la fig. 11 se muestra una curva de calibración de medidas en superficie de este nuevo modelo.

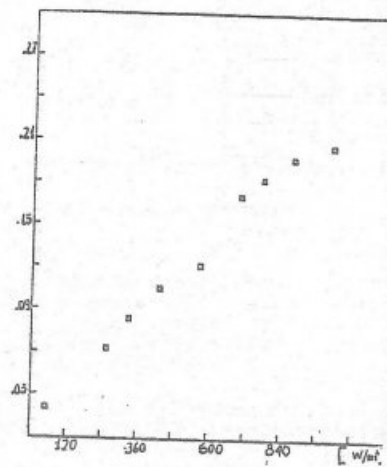


Fig. 11

$\rho_c$ : densidad de la cobertura

El programa realizado en base a este modelo también se evalúa la derivada de la respuesta en cada instante de tiempo. La Fig. 7 muestra las curvas gráficas de este programa donde se explicitó la respuesta en función de  $\sqrt{t}$ .

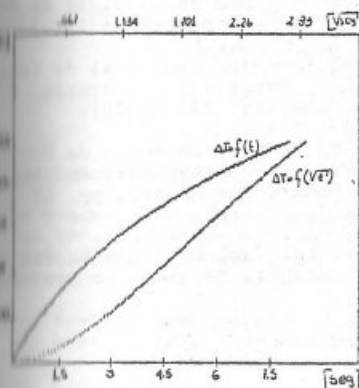


Fig. 7

### 5. RESULTADO DE ENSAYOS DEL PRIMER PROTOTIPO

El primer modelo constaba de los sensores con los detectores centrados en las esferas. Para ello se usó detectores con encapsulado plástico. Las dimensiones del mismo sufrieron de los modelos computacionales antes mencionados.

Las mediciones se realizaron con voltímetro HP 3468A conectado a una computadora HP 75 funcionando como equipo de adquisición de datos. Las lecturas se realizan a la máxima velocidad posible de la interface (HPIL), almacenando en la microcomputadora la respuesta del sensor y tiempo desde que se expuso el sensor. Estos datos fueron volcados a una computadora mayor

para ser procesados. La radiación solar se midió con un solarímetro tipo ZONEN tipo CM10.

Los ensayos realizados con luz artificial mostraron la necesidad de cubrir la ventana del instrumento, en su parte central, con un círculo de 5 mm de diámetro a los efectos de minimizar la incidencia de radiación directa sobre el detector.

A continuación se hará referencia a los resultados obtenidos con radiación solar.

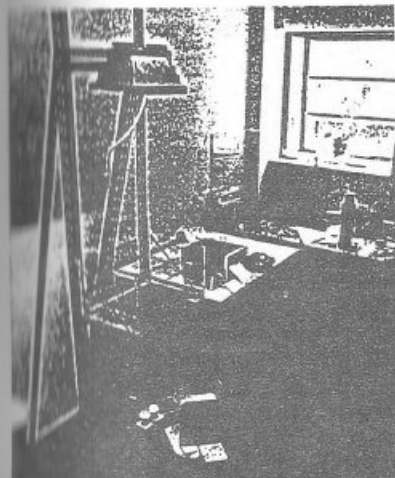


Fig. 8

La fig. 9 muestra la respuesta del sensor en el tiempo para una radiación constante (1004 w/m²) incidiendo perpendicularmente a la ventana del sensor. La misma respuesta se repite en la fig. 10 pero graficada en función de la raíz cuadrada del tiempo (sqr(t)). Como se puede observar de la comparación con la fig. 7 correspondiente a la respuesta del modelo computacional, existe gran similitud en las curvas.

#### Análisis de los Datos.

De acuerdo al modelo analítico planteado en el apartado 4.1. es posible a partir del procesamiento de la respuesta del sensor en el tiempo, obtener un valor proporcional a la radiación que generó dicha respuesta. Siguiendo estas pautas, se elaboró un programa para determinar

## BIBLIOGRAFIA

1. Non convecting Solar Ponds. H. Tabor, Z. Weinberger. Cap. 10 de Solar Energy Handbook - Kreider and Kreith (Mc Graw-Hill 1979).
2. Non convecting Salt-Gradient Solar Pond C. Nielsen. Cp. 11 de Solar Energy Handbook - Dickinson - Cheremisinoff (Dekker 1980).
3. Incorporación de las Pozas Solares al Proceso Industrial de Producción de sulfato de sodio. G. Lesino, J. Mangussi, L. Saravia, D. Galli. Actas de la 6a. Reunión de ASADES, pp. 143 (1980).
4. Construcción y Operación de la Poza de Sulfato de Sodio de Sociedad Minera Pompeya. G. Lesino, L. Saravia, J. Mangussi, R. Caso, D. Galli, J. Riera. Actas de la 7a. Reunión de ASADES, pp. 69 (1981).
5. Las Pozas Solares como Reactores Químicos. Aplicación a la Producción de Acido Bórico. G. Lesino, L. Saravia, Actas de la 8va. Reunión de ASADES, pp. 173 (1982).