

SISTEMA DE ENSAYO COMPARATIVO DE MUROS COLECTORES-ACUMULADORES Y SIMULACION DE UN MURO HOMOGENEO*

J. J. Elicabe Urriol y R. Gaspar

Grupo de Energía Solar, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario. Avda. Pellegrini 250, 2000 Rosario

Resumen

Se presenta un dispositivo para el ensayo comparativo de muros colectores-acumuladores de energía solar. El mismo está compuesto por dos módulos con condiciones internas controladas. La temperatura en cada recinto es regulada por un dispositivo electrónico proporcional, mientras que un ventilador provee un flujo de aire constante. Los primeros experimentos se efectuaron con un muro formado por dos placas verticales de asbesto-cemento rellenas con arena seca. Para el mismo se desarrolló un modelo unidimensional resolviendo la ecuación no estacionaria de conducción del calor para una placa homogénea. La distribución espacio-temporal de temperaturas se simula a partir de su perfil inicial y de sus condiciones de contorno sobre ambas caras. Del ajuste con las curvas experimentales se obtiene el valor de la difusividad del material del muro.

1. Introducción

Dentro de los muros colectores-acumuladores de energía solar existen numerosas alternativas de diseño, tales como el empleo de distintos materiales, la variación de las formas o dimensiones, la adición de cubiertas, sistemas de reflexión, protección, etc. Además, para cada caso pueden darse diferentes formas de operación.

Si bien el cómputo de costos de cada opción constructiva puede darse con facilidad, la selección final debe darse considerando además otras características, entre ellas la relación energía producida-costado del dispositivo. Con la finalidad de estudiar la prestación de distintas alternativas, se construyó un dispositivo experimental para el ensayo individual y/o comparativo de muros. En el presente trabajo se describen sus características generales y se presentan los resultados de los primeros ensayos realizados con un muro de características simples.

* Trabajo parcialmente financiado con fondos del Programa Nacional de Energía No Convencional de la SECYT

Se elabora además un modelo unidimensional para simular el campo de temperaturas de un medio homogéneo, debiendo darse para su utilización condiciones iniciales de la temperatura y de borde sobre ambas caras del muro. Por identificación se determina el valor de difusividad de la arena, de interés por tratarse de un material ya empleado en la vivienda Sol 55 (1), (2).

Se discute la aplicación del modelo al cálculo de los flujos de calor a través de las caras del muro y al cómputo de la variación de energía almacenada en un dado intervalo de tiempo. Se define, asimismo, un rendimiento generalizado para tiempos cortos y el rendimiento usual para períodos largos. Se exponen, finalmente, las perspectivas de investigación del tema.

2. Dispositivo de Ensayo

2.1. Descripción General

En la Fig. 1 se muestra una vista en planta. Se observan los dos módulos de ensayo (A y B), siendo las paredes Norte de cada uno de ellos el correspondiente muro a ensayar. Las restantes paredes, piso y techo se encuentran aisladas, como se describe más detalladamente en (3).

Cada módulo tiene un par de conductos de entrada y salida del aire. El extremo externo del conducto de entrada está acoplado a un ventilador centrífugo. El extremo interno del mismo conducto se halla soldado a un cilindro de distribución provisto de orificios que uniformizan la salida del aire. De esta manera se genera una corriente convectiva uniforme y suave sobre la cara interna del muro. La temperatura del aire de entrada se estabiliza mediante una resistencia eléctrica controlada por el regulador descrito en 2.3. Midiendo la diferencia de temperaturas del aire a la entrada y salida del módulo, es factible determinar el aporte del muro, ya que las transferencias por las paredes laterales, piso y techo son acotadas.

2.2. Sistema de adquisición de datos

Las temperaturas se miden a través de termocuplas de Cobre-Constantán (Tipo T, según normas NBS) de pequeño diámetro, a fin de minimizar la perturbación que ellas introducen en el muro. La radiación se determina mediante un solarímetro Kipp & Zonen . El conjunto de señales se envía, mediante un juego de zócalo y plaqueta, a un registrador Rikadenki de 24 canales. De esta manera se posibilita un rápido reemplazo del conjunto de valores en registro.

2.3. Sistema de termostatación

Un par de reguladores electrónicos gemelos, de tipo proporcional permiten regular (con un margen de $0,5^{\circ}\text{C}$) la temperatura de cada módulo. La salida de cada uno se conecta a la resistencia calefactora. El circuito de regulación se desarrolló sobre la base de otro de aplicación de National Semiconductor para su sensor de temperatura LM 3911 (4). Más detalles del mismo se dan en (3).

Es conveniente que el valor de temperatura seleccionado supere en unos 3°C el máximo de temperatura ambiente en el período de ensayo. De no ser así, puede ocurrir que el aporte de calor del muro exceda la capacidad de evacuación del ventilador, produciéndose las consecuentes sobre-excursiones de temperatura por encima del valor prefijado.

3. Ensayo del muro de arena seca

3.1. Descripción del muro y de la ubicación de las termocuplas

El muro ensayado se construyó rellenando con arena seca el espacio comprendido entre dos placas de asbesto-cemento separadas entre sí por unos 30 cm. Lateral e inferiormente contienen la arena placas de poliestireno expandido. Todo el recinto de contención está forrado con polietileno soldado, a fin de evitar la humidificación del contenido.

En la Fig. 2 se muestran detalles de la estructura del muro y del sistema de referencia elegido. La curvatura de las placas, se debe a la presión ejercida por la arena, que se comporta como un fluido para bajos valores de humedad.

Sobre la superficie externa del muro se aplicó pintura negro mate (Black enammel), no habiéndose colocado, en estos ensayos, una cubierta semi-transparente.

Para posicionar las termocuplas se construyó un esqueleto de varillas de madera muy delgadas, fijándose las posiciones internas con hilos tensados. Se colocaron termocuplas de control en las zonas laterales y una línea de ellas en la zona central. En el sistema de referencia dado en la Fig. 2 ésta corresponde a la recta $y = 0,50$, $z = 0,50$, estando separadas entre sí $0,05$ m y distando las más próximas a los bordes $0,033$ m de los mismos.

3.2. Mediciones e interpretación de datos

Luego de algunos ensayos preliminares, destinados a controlar la respuesta de los elementos de registro y control, se realizaron experiencias des-

tinadas a reproducir, para la época de ensayo (enero de 1980) la respuesta típica del muro en una condición invernal. Para ello se aprovechó la existencia de un brusco descenso de temperatura luego de varios días previos muy cálidos. De esa manera se tuvo el muro a una temperatura varios grados por encima de la ambiente. Para reproducir la condición de carga, se desconectó el sistema de calefacción, produciéndose la convección forzada con aire natural. Al iniciar la experiencia, la cara externa del muro se cubrió con una placa de poliestireno expandido, con el objeto de reducir el flujo hacia el medio ambiente. En la Fig. 3 se muestran las curvas de temperatura en el muro para $t = 0$; 6 y 11 horas (tiempo cero para las 20 horas del día 22 de enero).

Posteriormente se realizó otro ensayo destinado a observar el comportamiento del sistema en una situación real de verano. Para ello, la cara externa se aisló durante el día y se descubrió en el período nocturno. Los datos mostrados en la Fig. 4 corresponden al período nocturno desde las 23 horas del 28 de febrero hasta las 7 horas del día siguiente. El origen de tiempos se toma a las 23, hora local. De las curvas mostradas en la Fig. 4 se obtiene un gradiente de temperaturas en la cara interna de unos $55 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1}$. Para el valor de conductividad de la arena de $0,42 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ resulta una intensidad de flujo de energía de 23 W m^{-2} , valor importante para el diseño de sistemas de acondicionamiento estival. Se observa asimismo que los máximos de temperatura se encuentran cerca de la cara interna, lo cual indica la posibilidad de que, durante el día, se hubiera producido un sobrecalentamiento del recinto interno (que en ese lapso tiene mayor temperatura que el muro)

4. Modelización

4.1. Consideraciones Generales

Teniendo en cuenta que las propiedades térmicas del asbesto-cemento no son demasiado diferentes a la de la arena, y de que su espesor relativo es pequeño, puede tratarse el muro, desde el punto de vista térmico, como si fuera homogéneo. Por otro lado, dado que las partes laterales se encuentran aisladas, es factible considerar el problema como de tipo unidimensional. Aceptando que el único proceso de transferencia es el de conducción, la temperatura del muro será solución de la Ecuación no estacionaria:

$$\alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

donde α es la difusividad térmica, supuesta independiente de la temperatura. Para la resolución de la Ec. (1) se darán como datos el perfil inicial de temperaturas $f(x)$ y su evolución temporal sobre las caras interna y externa del muro ($\phi_1(t)$ y $\phi_2(t)$ respectivamente).

4.2. Formulación del modelo

En (3) se dan los detalles que posibilitan obtener la solución general de la Ec. 1 con las condiciones iniciales y de borde fijadas. La misma es:

$$T(x,t) = (2/l) \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-n^2 \pi^2 t/l^2) \operatorname{sen}(n\pi x/l) \left\{ \int_0^1 f(x') \operatorname{sen}(n\pi x'/l) dx' + n\alpha \pi l^{-1} \int_0^t \exp(\alpha^2 n^2 \pi^2 \lambda l^{-2}) (\phi_1(\lambda) - \phi_2(\lambda)(-1)^n) d\lambda \right\} \quad (2)$$

Para el conjunto de ensayos efectuados, correspondientes al período nocturno, se observó que $f(x)$, $\phi_1(t)$ y $\phi_2(t)$ admitían los siguientes ajustes:

$$f(x) = a x^2 + b x + c \quad (3)$$

$$\phi_1(t) = a_1 t^2 + b_1 t + c_1 \quad (4)$$

$$\phi_2(t) = a_2 t + b_2 \quad (5)$$

Las mediciones experimentales y correspondientes curvas de ajuste se muestran en las Fig. 5 y 6.

Introduciendo las expresiones (3) a (5) en (2) y reemplazando por sus sumas, obtenidas de las Ref. (5) y (6) algunas de las series que allí aparecen, se tiene:

$$T(x,t) = (2/l) \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{sen}(n\pi x/l) \cdot \exp(-\alpha n^2 \pi^2 t/l^2) \left\{ \int_0^1 (a x'^2 + b x' + c) \operatorname{sen}(n\pi x'/l) dx' - (2 a_1 l^5)/(\alpha^2 n^5 \pi^5) + (b_1 - (-1)^n a_2) \cdot (l^3/(\alpha n^3 \pi^3)) - (c_1 - (-1)^n b_2) (l/n\pi) \right\} + (a_1 t^2 + b_1 t + c_1) (1 - x/l) + (a_2 + b_2) (x/l) - (2 a_1 t + b_1) (l^2/\alpha) \left((x/l)/3 - (x/l)^2/2 + (x/l)^3/6 - (2 a_1 l^4/\alpha^2) ((x/l)/45 - (x/l)^3/18 + (x/l)^4/24 - (x/l)^5/120) - (a_2 l^2/\alpha) \cdot ((x/l) - (x/l)^3)/6 \right) \quad (6)$$

Expresión que contiene una serie de rápida convergencia. La Ec. (6) si bien compleja, puede ser calculada numéricamente con microcomputadoras. En el presente caso, se ha trabajado con una Hewlett-Packard HP-97. En (3) se dan detalles de los programas utilizados.

4.3. Ajuste y simulación del muro

En primer lugar, se identificó la difusividad α de la arena local, imponiendo la condición de ajuste de que el valor computado debe coincidir con el medido en $x = 0,1825$ m y $t = 11$ hs, que es donde el modelo muestra la mayor sensibilidad a α . El valor óptimo es:

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}.$$

En la Fig. 3 se muestran algunas de las curvas calculadas, junto con los valores experimentales. Se observa un alto grado de correlación.

5. Análisis de los resultados obtenidos

Un parámetro frecuentemente citado en el estudio de muros colectores-acumuladores es el de la velocidad de propagación de una onda en un muro semi-infinito de análogas características. De acuerdo a la Ref. (7), dicho valor es:

$$v = 2 \sqrt{\pi \alpha T^{-1}} \quad (7)$$

siendo T el período de la excitación. En nuestro caso, $T = 24$ hs y $v = 0,025$ m s⁻¹.

Si se desean computar los flujos a través de las caras externa e interna, deben calcularse las derivadas en $x=0$ y $x=1$. Como la solución $T(x,t)$ viene dada en el intervalo abierto $(0,1)$ deberán extrapolarse los valores obtenidos de las derivadas.

Conviene discutir finalmente el concepto de rendimiento de un muro. Para ello, partimos de la energía acumulada por el mismo por unidad de superficie, E ,

$$E = c \rho \int_0^1 (T(x,t) - T_0) dx \quad (8)$$

donde convencionalmente se asigna $E=0$ para $T=T_0$.

Si separamos la energía incidente H en una transferida al interior (q_i), otra perdida y una tercera acumulada (dada por dE/dt), todas por unidad de tiempo y área, se tendrá:

$$H = q_i + q_p + dE/dt \quad (9)$$

Si deseamos definir un rendimiento instantáneo del sistema, podemos proponer que una fracción k de la energía acumulada se transferirá al interior. El valor de k varía con las condiciones externas del sistema, pero a los fines de diseño puede asignársele un valor variable mensualmente. Podemos introducir así un rendimiento generalizado dado por:

$$R_g = (q_i + k dE/dt) / H \quad (10)$$

Si en cambio deseamos dar un valor promedio en el intervalo $(0, T_1)$ tendremos:

$$\bar{R} = \left(\int_0^{T_1} (q_i + k dE/dt) dt \right) / \left(\int_0^{T_1} H dt \right) \quad (11)$$

Comparando con la definición usual de rendimiento, vemos que ambas coinciden cuando

$$\int_0^{T_1} q_i dt \gg k (E(T_1) - E(0)) \quad (12)$$

Para q_i del orden de 50 W m^{-2} y un muro de 30 cm de espesor con oscilaciones de unos 10°C y conductibilidad k aproximadamente $1 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (condiciones relativamente rigurosas) la condición (12) se satisface para T_1 de unas 24 horas.

3. Conclusiones y Perspectivas

El grado de control obtenido en el dispositivo de ensayo puede considerarse satisfactorio. No obstante, podría aún mejorarse con el ajuste de algunos detalles técnicos. Se encuentra en ensayo uno de los muros de la vivienda Sol 55 (8), previéndose asimismo otras mediciones con nuevos materiales y diseños, que se esperan asimismo modelizar.

La utilidad del modelo teórico está dada por la posibilidad de predecir el campo de temperaturas (y el consecuente cómputo de los flujos de calor) a través de una única condición inicial en el interior del muro y registros permanentes de las condiciones de borde. Ello simplifica la toma de datos al reducirse las variables en registro. Siguiendo el esquema de 4.2., se espera generalizar las Ec. (3) a (5) para reproducir condiciones distintas a las presentadas. Indirectamente, se brinda la posibilidad de determinar dinámicamente la difusividad del material ensayado.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los restantes integrantes del Grupo de Energía Solar, como así también a las autoridades y personal de la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería y del Observatorio Astronómico Muni-

cial por el apoyo brindado.

Referencias

- 1.- E. Di Bernardo, R. Gaspar y R. D. Piacentini. " Experimentación de una vivienda solar con ganancia directa y acumulación de calor." Comunicación en la IV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, La Plata, 1978.
- 2.- E. Di Bernardo, R. Gaspar y R. D. Piacentini. " Estudio comparativo de la vivienda Sol 55 durante dos períodos invernales". Comunicación en la V Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, Córdoba, 1979.
- 3.- J. J. Eligabe Urriol. " Sistema de Ensayo Comparativo de Muros Coletores-Acumuladores". Trabajo Final para optar al título de Licenciado en Física. Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario, 1980.
- 4.- National Semiconductors Corp. " Linear Data Book National", New York, 1976
- 5.- I. S. Gradshteyn & J. M. Ryzhik. "Table of integrals, series and products". Academic Press, New York, 1965.
- 6.- V. Mangulis. " Handbook of series for scientists and engineers". Academic Press, New York, 1965.
- 7.- Carslaw & Jaeger. " Conduction of Heat in Solids". Oxford University Press, Oxford, 1959
- 8.- E. Di Bernardo, J. J. Eligabe Urriol' y R. D. Piacentini. "Consumo energético de la vivienda Sol 55 y experimentación de su muro acumulador" A ser comunicado en la VI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar. Catamarca, 1980.

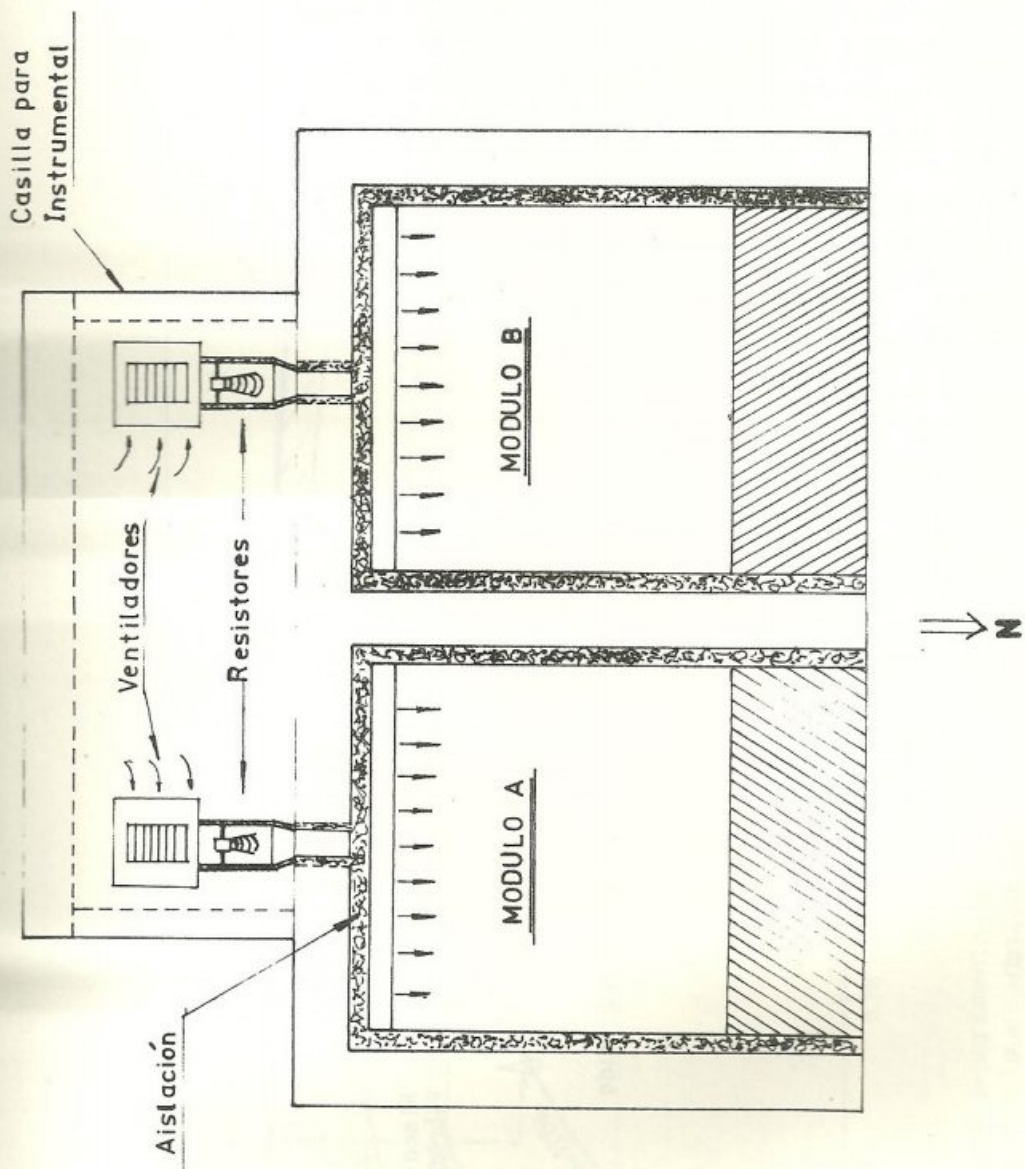


Figura 1. Vista en planta del sistema de ensayo comparativo.

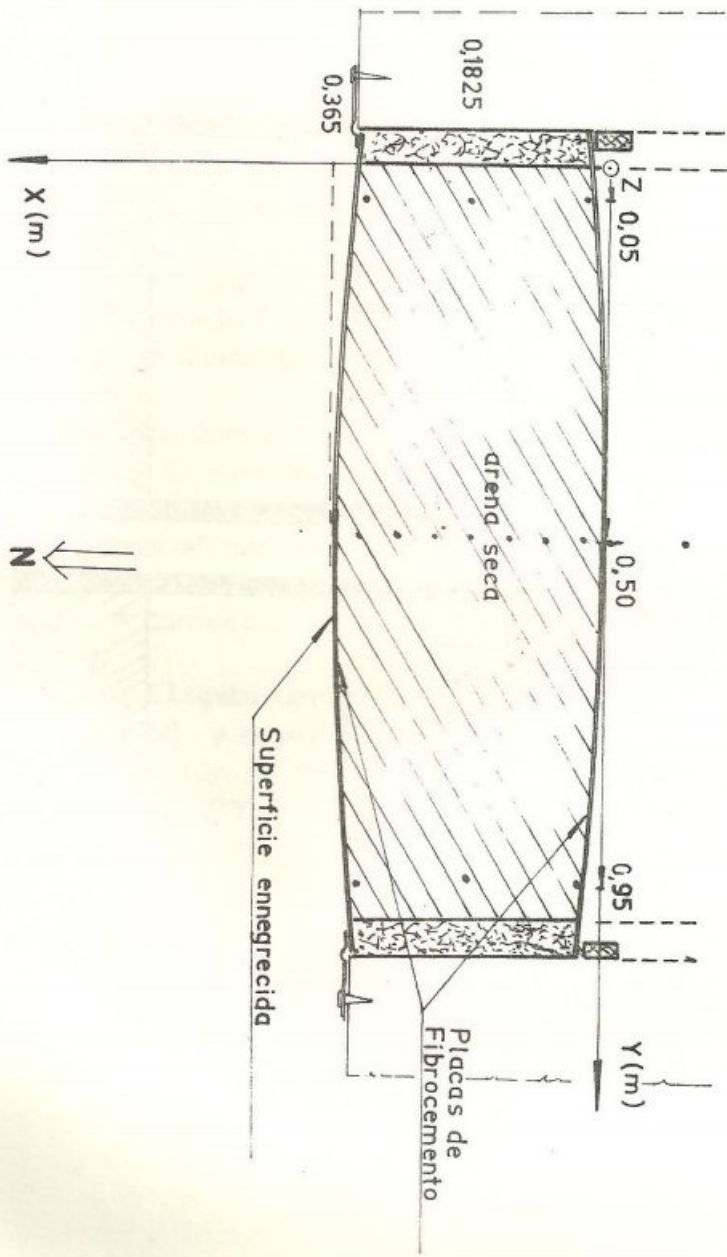


Figura 2. Estructura del muro. $y=0,50$ m y $z=0,50$ m indican el eje central. Los puntos indican posiciones $y-x$ de toma de datos.

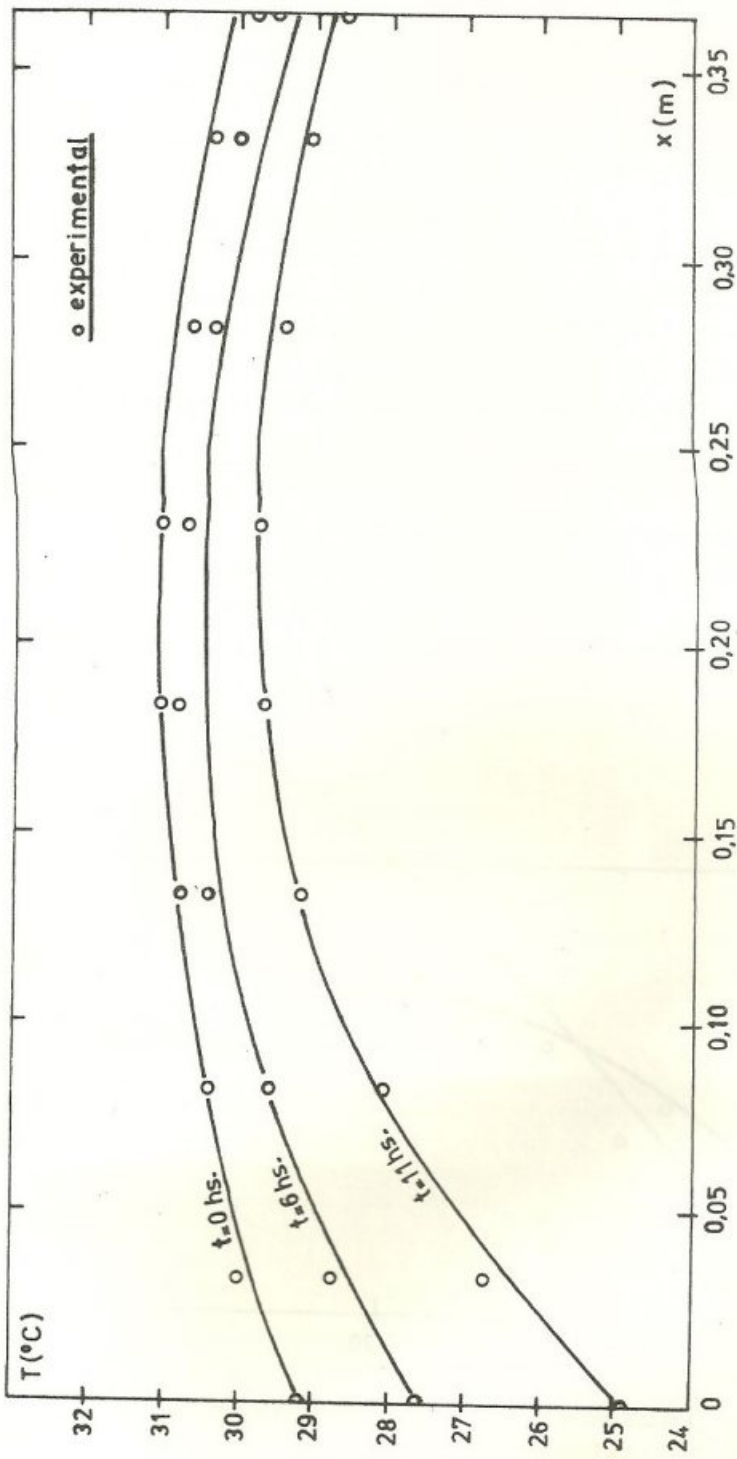


Figura 3. Registros experimentales y curvas teóricas del campo de temperaturas para la simulación de una condición invernal.

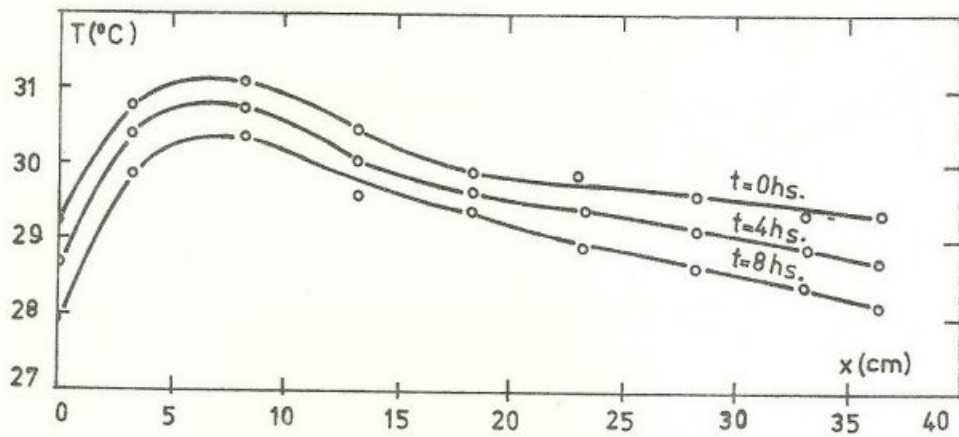


Figura 4. Campo de temperaturas en una condición de verano.

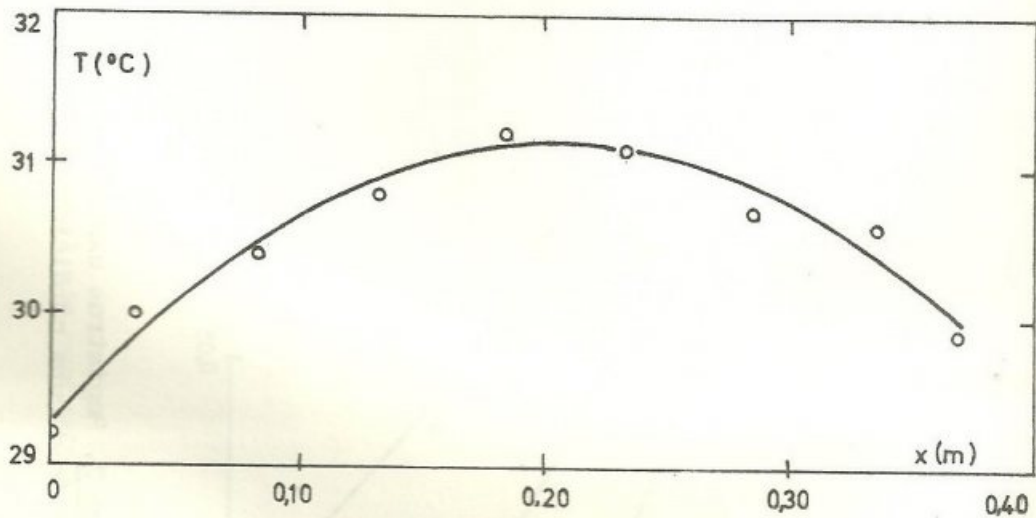


Figura 5. Datos experimentales y curva de ajuste para la condición inicial.

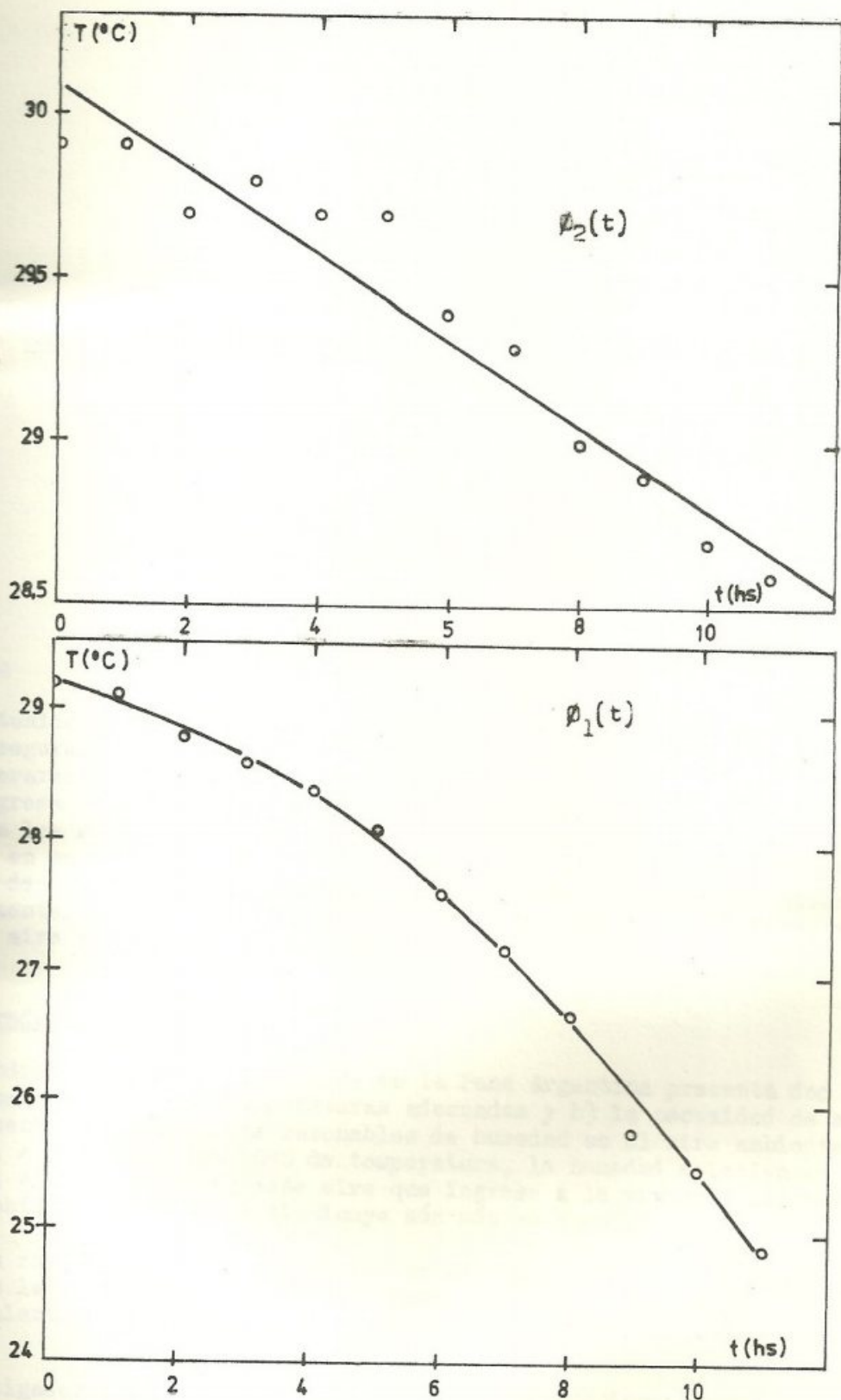


Figura 6. Datos experimentales y curvas de ajuste de las condiciones de borde.