

PROTOTIPO DE VIVIENDA PARA ENSAYO DE TECHOS COLECTORES SIN  
CUBIERTA Y ACUMULACIÓN EN EL PISO

María Grión, Liliana Castro Padula,  
Graciela Lesino y Luis Saravia\*

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

RESUMEN

En este trabajo se estudia un sistema de calefacción solar de bajo costo para viviendas que hace uso de colectores sin cubierta transparente integrados al techo, en combinación con un acumulador en el piso que consiste de una losa atravesada por cañerías por las que pasa el aire caliente recogido por un ventilador en el techo.

Se ha planteado un modelo computacional tridimensional en diferencias finitas para el piso en combinación con un esquema en una dimensión para el techo colector, con el cual se trata de optimizar las dimensiones del sistema.

Con el fin de validar el modelo se ha diseñado un prototipo experimental cuya construcción se detalla. Consta de dos módulos íntegros de 4 x 5 m<sup>2</sup>, uno de los cuales se acondiciona en forma solar y el otro con técnicas convencionales, lo que permite una comparación detallada del comportamiento térmico en ambos casos.

También se incorpora un esquema de acondicionamiento para el verano en el que se induce la ventilación diurna y nocturna según varios esquemas alternativos a comparar.

1. INTRODUCCION

Dentro del marco del proyecto de Acondicionamiento Térmico de Viviendas Rurales y Semirurales en el NOA, se ha realizado un estudio climático con el fin de establecer las regiones con características diferenciales desde el punto de vista del uso de sistemas solares. Una de las zonas más importantes teniendo en cuenta su situación

demográfica es aquella que contiene a la ciudad de Salta. Su diagrama de Olayay, que se muestra en la Fig. 1, indica que el clima de esa región se caracteriza por inviernos y veranos moderados, con un régimen de viento de poca intensidad. Se ha planteado el uso de un sistema de acondicionamiento híbrido que aprovecha dichas condiciones para asegurar un funcionamiento correcto a muy bajo costo.

Durante el invierno se usa como colector el propio techo, sin cubierta transparente, tal cual se esquematiza en la Fig. 2. El aire caliente en el pleno formado por el techo y el cielo raso es recogido y enviado al piso donde se ha construido una losa atravesada por cañerías que hace las veces de acumulador. Durante la noche la losa disipa el calor hacia las habitaciones por convección natural y radiación. La Fig. 3 muestra un corte del piso acumulador. El sistema aprovecha las condiciones climáticas para lograr una eficiencia aceptable a bajo costo.

Para el verano se instala un conjunto de ventanillas destinado a refrescar el local mediante ventilación. Dos de las posibles alternativas se esquematizan en la Fig. 4. En una de ellas, durante el día se logra una ventilación cruzada en los locales en forma pasiva usando el efecto chimenea en el techo. En la otra el ventilador funciona durante la noche tomando aire fresco externo, bajando su temperatura por radiación nocturna del techo y haciéndolo circular por el acumulador que de esa manera es preparado para ser usado al día siguiente.

Se encara el estudio del sistema por dos vías. Por un lado se ha construido un prototipo constituido por dos módulos de 4 x 5 m<sup>2</sup> cada uno. Uno de ellos funciona con el sistema solar mientras que el otro lo hace en forma convencio-

\* Investigador del CNIE

# Instituto UNSa - CONICET

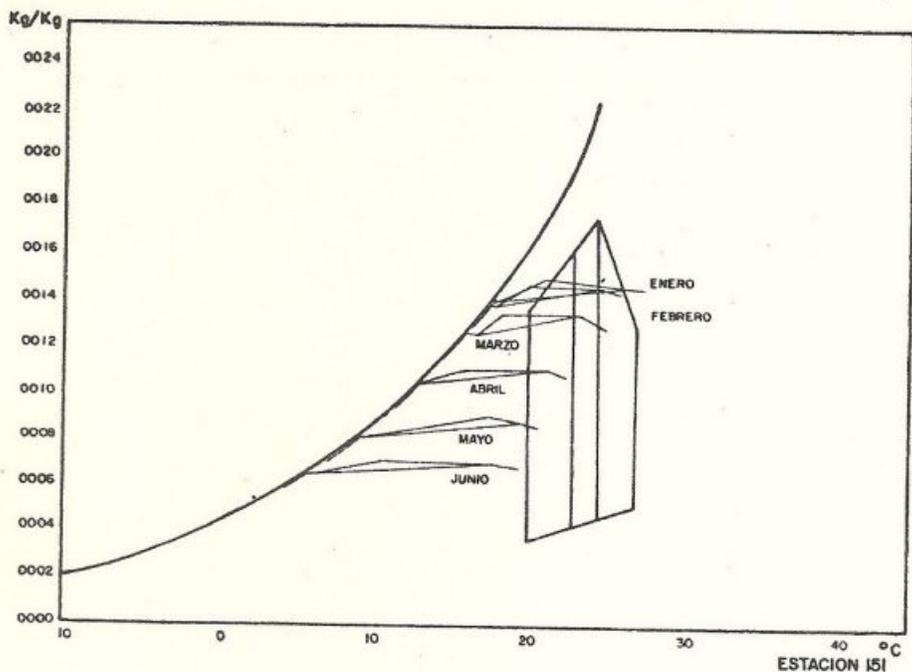


Fig. 1. Diagrama bioclimático de confort de Salta

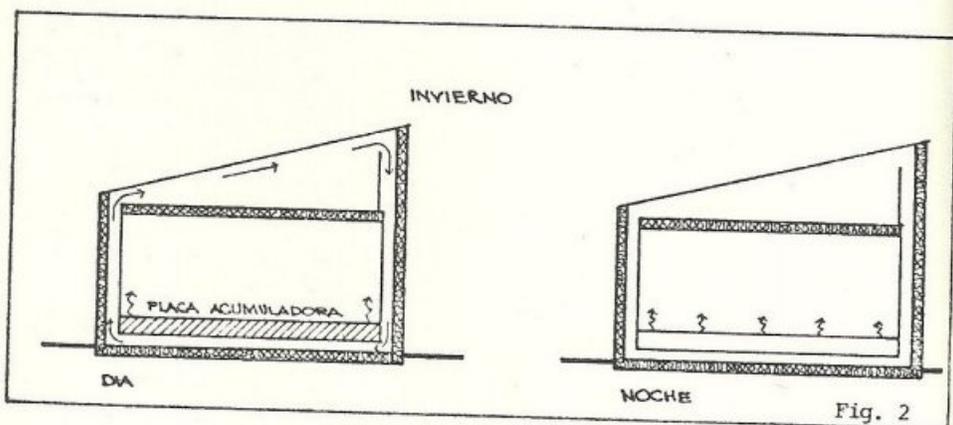


Fig. 2

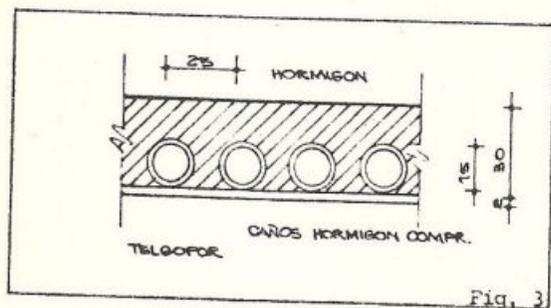


Fig. 3

nal haciendo las veces de testigo. Los detalles constructivos del prototipo se detallan en la sección siguiente. Por otro lado se realiza una modelización computacional en la que se tiene en cuenta el colector con un modelo unidimensional y el acumulador uno tridimensional. Los parámetros del modelo se eligieron por comparación con los datos experimentales y permitirá optimizar el flujo de aire, espesor de losa, diámetro de cañerías y distancia entre ellas. Los detalles del modelo se describen en una de las próximas secciones.

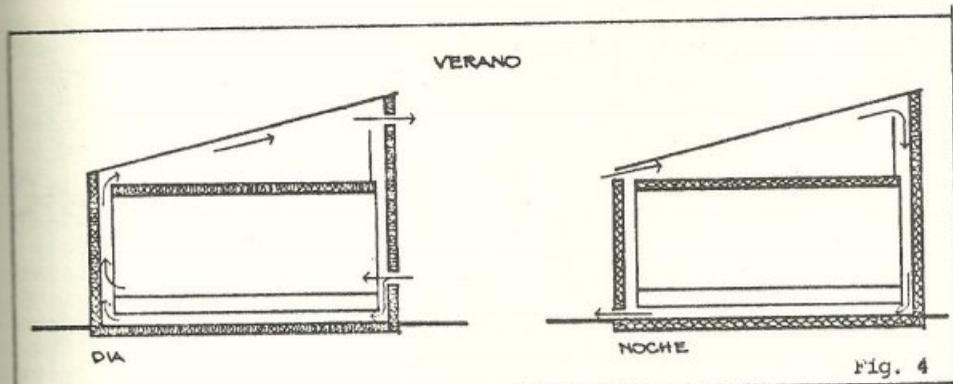


Fig. 4

### DISEÑO Y CONSTRUCCION

Se diseñaron y construyeron dos módulos de 5.00 x 4.00 m cada uno y una altura interior de 2.50 m, con paredes dobles de ladrillo cerámico hueco de 6 cm de espesor, de 8 x 18 x 33 cm. En la cámara intermedia de los muros se ubicó una aislación de 5 cm de telgopor de 10 Kg/m<sup>3</sup> de densidad y que llega desde la viga de encañonado superior hasta la viga de encañonado inferior. Esta última fue proyectada aproximadamente 50 cm por debajo de lo tradicionalmente acostumbrado, para permitir que la aislación llegue a un nivel inferior que el nivel del piso interior a fin de disminuir las pérdidas perimetrales, como se ve en

el detalle de la Fig. 5. En las Fig. 6a y 6b se ven la planta y 2 cortes de uno de los módulos. En los cortes se distinguen 8 ventanas pequeñas; de las 4 inferiores, dos están ubicadas por debajo del nivel de piso interior, en comunicación con el contrapiso, y serán utilizadas para la evacuación del aire enfriado por radiación nocturna del techo, que circula por el contrapiso (ver funcionamiento del sistema para el verano) y 2 están sobre el nivel de piso interior y se utilizarán para ventilación del local. Las 4 ventanas superiores permitirán la circulación del aire que, al lamer la chapa la enfriará durante el verano y permitirán un efecto de chimenea que ayudará a la ventilación del local. Todas ellas están aisladas durante el invierno, con 5 cm de telgopor. Para iluminar y ventilar se diseñó una ventana de dimensiones convencionales en la pared sur. El muro norte es totalmente ciego, previniéndose la posibilidad de acoplar en el futuro algún otro sistema sobre él. Uno de los objetivos del proyecto es lograr un sistema de fácil y rápida construcción, de bajo costo, y con materiales de uso habitual en la zona

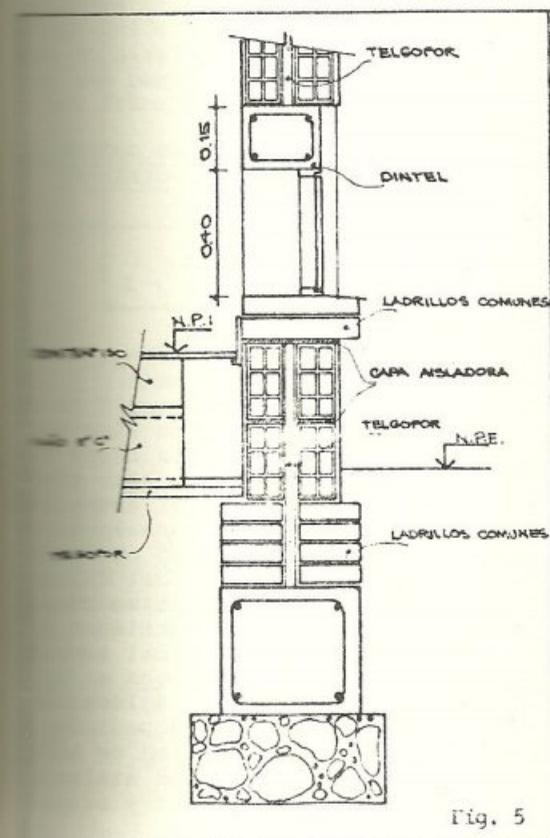


Fig. 5

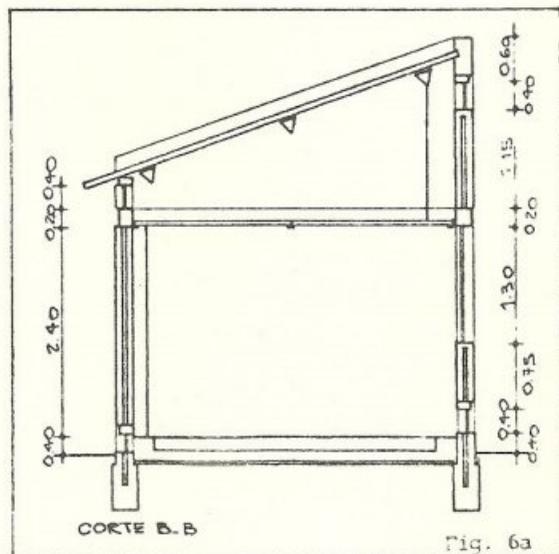


Fig. 6a



de norte a sur por caños de hormigón comprimido de 15 cm de diámetro, separados, a ejes, 25 cm. El contrapiso termina a 20 cm de los muros norte y sur, creándose, de esta forma dos plenos de 30 cm de profundidad a todo lo largo del local. Respecto del acumulador, se analizaron varias posibilidades teniendo en cuenta costos, sencillez de construcción y respuesta térmica. Se estudió el diseño de un sistema de encofrado rescatable para la ejecución de los conductos. Se descartó la posibilidad por las complicaciones constructivas y de mano de obra. Otras opciones estudiadas fueron: encofrado perdido de cartón corrugado y de chapa galvanizada. La primera fue desechada, a pesar de su bajo costo, por su poca resistencia a la deformación y la segunda porque, de no ser recuperable no era económicamente conveniente. Por todas estas razones, y su óptima respuesta térmica se eligió finalmente el uso de caños de hormigón comprimido. En un futuro se estudiará la factibilidad térmica, económica y constructiva del uso de losas huecas pretensadas.

Para el retorno del aire se construyeron dos conductos verticales de aglomerado con ángulos metálicos, ubicados en ambos extremos del muro norte. La disposición de la bajada y los retornos de aire se pensó a fin de favorecer una pareja distribución del calor o del frío.

#### 2. MODELO DEL SISTEMA SOLAR DE CALENTAMIENTO

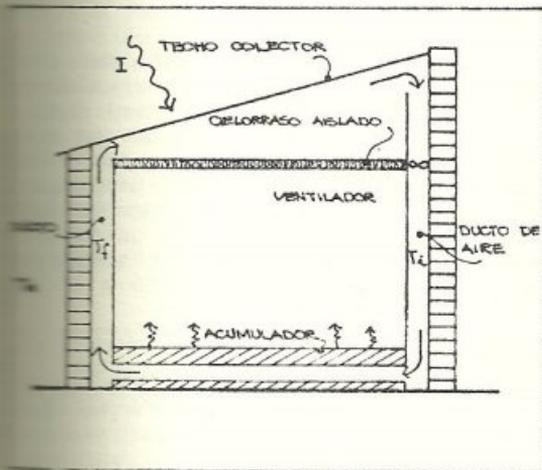


Fig. 7. Esquema del sistema solar de calentamiento.

La Fig. 7 muestra un esquema del sis...

tema solar. El aire recircula mediante un ventilador entre el colector y el acumulador. Se plantea un modelo computacional en el que los datos climáticos, radiación  $I$  y temperatura del aire externo  $T_e$ , cambian de hora en hora y se tratan por separado el colector y el acumulador. Este último se analiza en forma numérica mediante un esquema en diferencias finitas en el cual el cálculo avanza en intervalos elementales de tiempo  $\Delta t$ , los que se eligen de manera que se asegura la estabilidad del esquema. La temperatura de salida del aire del acumulador,  $T_f$ , sirve de entrada para el colector, suponiéndola constante durante el incremento de tiempo  $\Delta t$ . El colector se trata en forma analítica evaluándose la temperatura de salida del colector,  $T_t$ , que sirve de temperatura de entrada de aire al acumulador durante el próximo intervalo.

A continuación se describe el modelo analítico del colector. La Fig. 8 ilustra

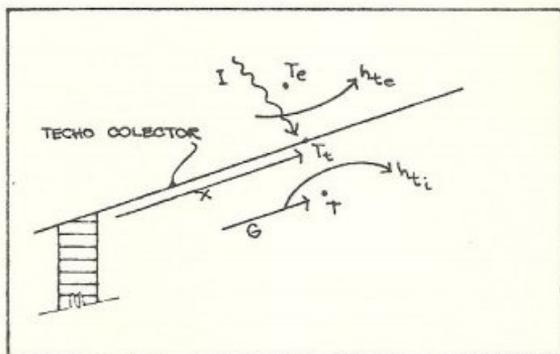


Fig. 8. Esquema del intercambio térmico en el techo.

tra la nomenclatura de los parámetros más importantes. La distancia a lo largo del colector es  $x$ , siendo  $a$  su ancho. Si se plantea el balance térmico en un elemento  $\Delta x$  para la chapa del colector y para el flujo del aire, se obtienen dos ecuaciones:

$$h_{ti} \cdot a \cdot (T - T_t) = -C_p \cdot G \cdot \frac{dt}{dx}$$

$$h_{ti} \cdot a \cdot (T - T_t) = a \cdot \alpha \cdot I - h_{te} \cdot a \cdot (T_t - T_e)$$

donde:

$T(x)$  = temperatura del aire que fluye a la distancia  $x$  ( $^{\circ}C$ )

$T_t(x)$  = temperatura de la chapa del colector a la distancia  $x$  ( $^{\circ}C$ )

$G$  = flujo de aire ( $kg/seg$ )

$h_{ti}$  = coef. de convección del aire de bajo de la chapa colectiva

$h_{te}$  = coef. de convección del aire por encima de la chapa colectiva

$\alpha$  = coeficiente de absorción de la chapa colectora en el visible

$C_p$  = calor específico del aire (Jul/Kg °C)

Resolviendo el sistema se obtiene la temperatura de salida  $T_i$ :

$$T_i = T_c + \frac{\alpha I}{h_{te}} + \left( T_f - T_c - \frac{I}{h_{te}} \right) e^{-\frac{h_{ti} h_{te}}{h_{ti} + h_{te}} \frac{a \cdot l}{G C_p}}$$

La Fig. 9 muestra un esquema del acumulador en el piso con sus cañerías y la aislación en el piso. Si el piso se supone indefinido en el sentido del eje x se puede seleccionar una unidad elemental que comprende un solo caño, a partir de la cual se obtiene el comportamiento de todo el piso por simetría.

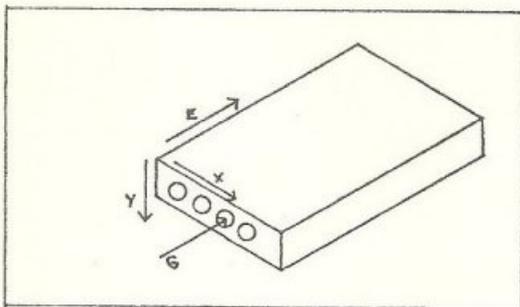


Fig. 9. Esquema del sistema de ejes sobre la placa acumuladora.

Ello se muestra en corte en la Fig. 10. Las paredes laterales adiabáticas aseguran que se cumplan las condiciones de borde.

Para establecer una simulación numérica en diferencias finitas se define una red en el elemento con JM x IM x KM puntos según se muestra en la Fig. 10. En lo que sigue se limitará la forma geométrica de la cañería a aquéllas en que el perímetro de su sección está formado por segmentos que unen los puntos de la red.

La ecuación de balance térmico se plantea en un paralelepípedo de material que rodea a cada punto (I, J, K) de la red según muestra la Fig. 11. Existen paralelepípedos en distintas condicio-

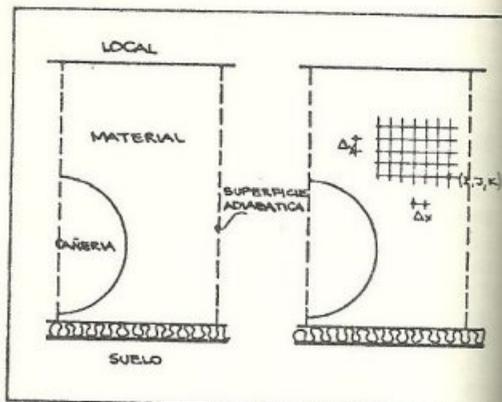


Fig. 10. Esquema de la unidad elemental de acumulador y la grilla para el cálculo numérico.

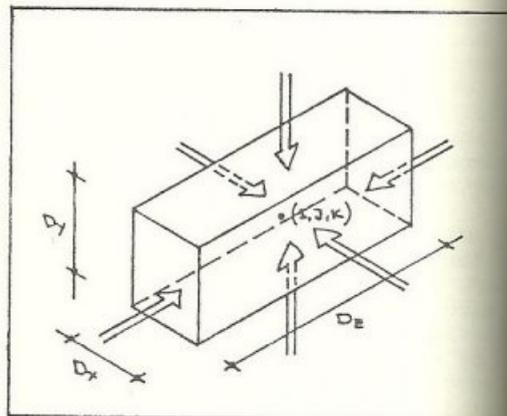


Fig. 11. Esquema del volumen alrededor del punto (I, J, K) donde se realiza el balance.

nes de acuerdo a la posición del punto que rodea. En el caso más sencillo el punto está rodeado de material y se calcula la cantidad de calor que entra por cada una de las 6 caras teniendo cuenta el salto de temperatura entre los dos puntos de la red a ambos lados de la cara. Los aportes de calor aumentan la temperatura del material del paralelepípedo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_p \rho \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \frac{T'(I, J, K) - T(I, J, K)}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta x \Delta y k}{\Delta z} [T(I, J, K+1) + T(I, J, K-1) - 2T(I, J, K)]$$

$$\frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} k [T(I, J+1, K) + T(I, J-1, K) - 2T(I, J, K)]$$

$$\frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} k [T(I+1, J, K) + T(I-1, J, K) - 2T(I, J, K)]$$

donde:

$T(I, J, K)$  es temperatura del material en el punto I, J, K en el instante  $\tau$ .

$T'(I, J, K)$  es temperatura del material en el punto I, J, K en el instante  $\tau + \Delta t$ .

$k, \rho, c_p$  son la conductividad térmica, calor específico y densidad del material

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  son las distancias entre puntos a lo largo de los tres ejes.

Existen otros casos más complicados de lado a que por el punto I, J, K pueden pasar planos adiabáticos, el perímetro de la cañería o las superficies inferior y superior del piso, así como combinaciones de ellos. No se escribirán las ecuaciones de cada caso ya que son similares salvo que en cada uno se deben tener en cuenta las condiciones de borde apropiadas. En el caso de los paralelepípedos en contacto con la cañería o la superficie superior del piso también se calculan las cantidades de calor intercambiadas con el aire proveniente del techo y con la habitación, permitiendo establecer el balance térmico de ésta y del aire que circula. Las ecuaciones planteadas permiten obtener por cálculo directo la distribución de temperaturas en un tiempo  $\tau + \Delta t$  a partir de los valores en el instante  $\tau$  y las condiciones de borde.

#### 4. RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL

El modelo computacional ha sido utilizado para seleccionar los distintos parámetros del sistema de calentamiento solar: flujo de aire, espesor del acumulador, diámetro de caños y distancia entre éstos, de manera de obtener un funcionamiento adecuado. A continuación se detallan a modo de ejemplo los resultados obtenidos para un día de invierno. La Fig. 12 muestra

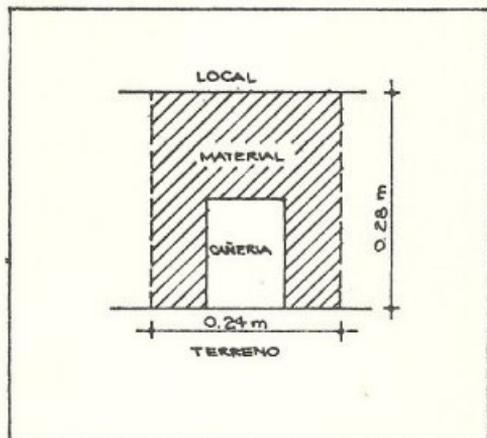


Fig. 12. Elemento de acumulador en el piso sobre el cual se realizó el cálculo.

las dimensiones de un elemento del acumulador tal cual ha sido usado en el cálculo. La Tabla I da los valores utilizados para las distintas constantes del modelo.

Tabla I

Parámetros utilizados en el modelo

Area del local:	4 x 5 m <sup>2</sup>
Masa de paredes:	5950 kg
Pérdida térmica del local:	54 w/°C
Flujo de aire:	.35 kg/s
Coef. convectivo piso:	8 w/m <sup>2</sup> °C
Coef. convectivo cañerías:	14w/m <sup>2</sup> °C
Coef. convectivos techos:	
interior:	10w/m <sup>2</sup> °C
exterior:	10w/m <sup>2</sup> °C
Conductividad material piso:	1.7 w/m °C

La Fig. 13 muestra la variación durante el día de las temperaturas de mayor importancia en el local. Mientras la temperatura externa cambia entre 3 y 13°C, el local sólo varía entre 17.5 y 20.5°C a pesar de que el colector entrega energía en un período limitado de 6 horas. La temperatura en la superficie del piso no sobrepasa los 28° lo que ocurre a las 15h en la zona cercana a la entrada del aire en el piso. La Fig. 14 muestra la distribución de temperatura en la superficie del piso entre dos caños en ese momento. Este aspecto es im-

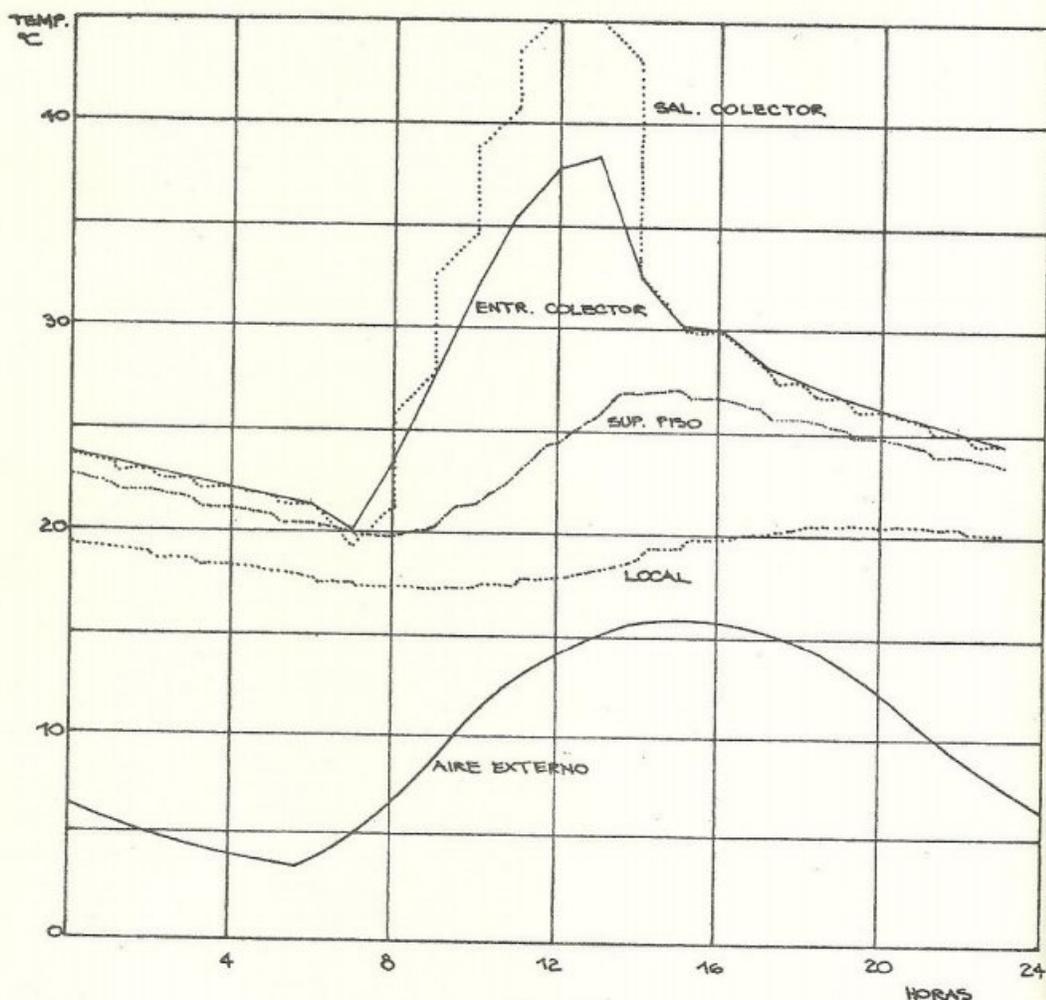


Fig. 13

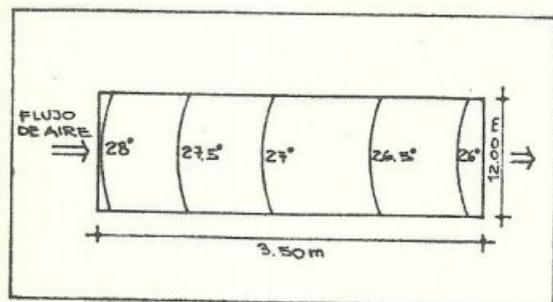


Fig. 14. Líneas de nivel de la distribución de temperatura en un elemento de la superficie del acumulador.

portante ya que si la temperatura del piso subiese más comenzaría a ser molesta para los habitantes. El rendimiento del colector es del 16.3%. El 83% de la energía recogida llega al local a través de la superficie del piso. El 17% restante es perdido a través del

suelo.

### 5. DISCUSION

Los resultados del modelo indican que el sistema desarrollado es factible de ser usado con un reemplazo importante de energía en los días claros. Una vez que se construyan los prototipos, se rá un refinamiento del modelo especialmente de los coeficientes convectivos de manera de obtener resultados coincidentes con los experimentales. Los sistemas de medida tienen dos objetivos principales: 1) obtener los valores de temperatura, flujos, radiación y vientos necesarios para validar los modelos desarrollados y realizar balances energéticos del prototipo solar; 2) obtener resultados que permitan una comparación del funcionamiento del prototipo solar con el del prototipo no solar.