

CONSUMO ENERGETICO DE LA VIVIENDA SOL 55 Y EXPERIMENTACION DE SU MURO COLECTOR-ACUMULADOR *

E. Di Bernardo^o, J.J. Elicabe Urriol y R.D. Piacentini^x

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

Resumen

La vivienda Sol 55, primera vivienda solar construída y habitada del país, ha sido experimentada en período invernal durante varios años y sus resultados publicados y comunicados a nivel nacional e internacional. En el presente trabajo se analiza su consumo energético en los meses de otoño-invierno, para mantener condiciones aceptables de confort.

A los efectos de cuantificar el comportamiento de la superficie captora, se realizaron cálculos de la resistencia térmica de la zona de ganancia directa y mediciones del muro colector-acumulador de bloques de hormigón con sus huecos rellenos de arena en un módulo de ensayo. Se presentan las curvas de distribución espacio-temporal de temperaturas del interior de dicho muro inhomogéneo y se analizan los flujos de calor asociados.

1. Introducción

La vivienda solar pasiva Sol 55 ha sido diseñada y comenzada a construir en 1970. Fue habitada en junio de 1978 y con el presente período otoño-invernal de 1980, se han completado tres años de experimentación.

Las mejoras sucesivas fueron introducidas a medida que se obtenían nuevos resultados (1), (2), (3) y se sugerían innovaciones, llegándose a la etapa actual, en la cual prácticamente todo el año se encuentra dentro del entorno de confort bioclimático.

* Trabajo parcialmente financiado con fondos del Programa Nacional de Energía No Convencional, Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.

^o Del Instituto de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, U.N. Rosario.

^x Del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

En el parágrafo 2 se realiza una descripción de las mejoras introducidas, en el 3 se presentan los detalles del cálculo del consumo energético invernal en un día relativamente frío, en 4 se analizan las mediciones efectuadas en el módulo de ensayo del muro colector-acumulador empleado en la vivienda y en 5 se detallan las conclusiones y perspectivas futuras.

2. Descripción de las modificaciones introducidas en la vivienda

Dado que la vivienda ha sido analizada en detalle con anterioridad (1), (2), (3), se describen a continuación solamente las modificaciones introducidas en el último año (Fig. 1 y 2):

- a) los colectores inferiores han sido cubiertos con vidrios comunes de 3 mm de espesor.
- b) se ha completado la aislación del techo efectuando sobre la losa de viguetas pretensadas una impermeabilización asfáltica de seis operaciones, que se comporta como barrera de vapor. Sobre esta impermeabilización se ha pegado poliestireno expandido, de una densidad de 16 kg/m³, mediante una suspensión asfáltica en agua. Superiormente se ha efectuado el mismo tratamiento asfáltico, terminándose con un mortero de cemento y arena, armado con fibra de vidrio.
- c) las ventanas de la pared oeste se han protegido con una ventana deslizante, armada con tablillas de enrollar de PVC y la puerta de acceso a la vivienda ha sido aislada de forma tal de poder desmontar fácilmente la aislación durante el día.

2.1. Comportamiento estival

Durante el último verano 1979-1980, se han efectuado mediciones parciales que se completarán en el próximo período. Dichas mediciones y la habitabilidad continua en estos meses, han mostrado que se obtiene un confort aceptable en prácticamente todas las noches de verano. Esto se logra en parte por la escasa masa térmica del entorno urbano, lo que permite cierta amplitud térmica día-noche, y la buena ventilación cruzada.

El enfriamiento nocturno de la masa térmica interior regula la temperatura media de la vivienda alrededor de los 27°C, hasta unas 3 hs después del mediodía solar. Luego comienza a predominar el flujo de calor desde el techo (que no se encontraba aún totalmente aislado). La aislación ya completada del mismo, que ha reducido su conductancia a 0,6W/m², y la adición antes de que comience el próximo verano de un sistema de rociado para mantenerlo húmedo, disminuirá sensiblemente el flujo térmico.

2.2 Comportamiento invernal

En los meses de otoño-invierno, se registraron durante algunos días las temperaturas medias del interior de la vivienda, con los muros colectores-acumuladores inferiores sin vidrio ni tapa y sin aporte extra de energía de calefacción. En particular en días de buena radiación (unos 20 MJ/m^2), brisas normales (algunos km/h de promedio) y temperatura mínima de -2°C , la más baja temperatura del interior fue de 15°C hacia la hora solar -6 h. La máxima interior en las mismas condiciones llegó a 23°C a 1,5 h respecto del mediodía solar.

Cuando se colocaron los vidrios en los colectores inferiores, se obtuvieron en condiciones análogas, temperaturas interiores mínimas y máximas de 17°C y 24°C , respectivamente. Además, el registro simultáneo y continuo de la humedad relativa interior indicó que la misma osciló entre un 60 % y un 80 %. Dado que la zona de confort bioclimático ambiental se superpone en gran parte con la definida por estos entornos de humedad relativa y temperatura, que los usuarios de la vivienda adaptan su forma de vida al régimen solar (vestimenta, etc.) y que los habitantes de la región de la Pampa Húmeda aceptan en general condiciones de humedad relativa mayores, puede considerarse que en días de cielo claro el sistema no necesita prácticamente aporte extra de calor. Si bien la amplitud de la oscilación diaria de la temperatura interior no es excesiva (8°C), para mejorar aún más el confort debería reducirse sensiblemente dicha amplitud (4). El origen de este fenómeno se encuentra en el gran tamaño del área de ganancia directa, en comparación con el resto de la pared captora (40 %) y en el inadecuado intercambio térmico con las superficies interiores (piso, paredes y techo), las que se encuentran siempre a menor temperatura que el aire. Este último se origina en la existencia de alfombras y de grandes superficies amuebladas contra las paredes y piso, que serán controladas en el diseño de la ampliación de la vivienda. El problema ocasionado por el deficiente intercambio de calor, así como la propuesta de una masa térmica variable (5) serán objeto de un detallado estudio futuro.

En días con cielo totalmente cubierto, la temperatura ambiente exterior fluctúa entre unos 7°C y 12°C durante las 24 horas, siendo la mínima interior de 15°C . Es evidente que en tales días resulta necesario un aporte suplementario de calor, el que se entrega (fuera de estos períodos de experimentación) mediante resistencias eléctricas. Si bien el costo por unidad de energía suministrada es sensiblemente mayor a la obtenida con gas, kerosene, etc., tiene grandes ventajas de otra índole, tales como la de evitar riesgos de incendio, asfixia, la reducción del consumo de oxígeno y la producción excesiva de vapor de agua. De este modo se obtiene una economía indirecta de energía, al reducirse las necesidades de aireación en el interior de la vivienda.

A los fines de ensayo, se posibilita un control sencillo de la potencia entregada.

La calefacción ambiental eléctrica es ampliamente utilizada en países tecnológicamente desarrollados, con la condición de que la vivienda esté suficientemente aislada. En el presente caso se cumple esta condición, ya que se emplea en mínima proporción, por ser sólo un aporte extra y además la conductancia media de la envolvente, sin tener en cuenta el plano Norte captor ni el piso, es en promedio de $1,1 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Cabe destacarse que se encuentra en la etapa de diseño una vivienda electro-solar, a ser construída en la zona de Rosario.

3. Balance térmico

El balance térmico se ha efectuado considerando un día de invierno de cielo claro, con vientos Sud-Sudoeste de 10 km/h de velocidad y temperaturas medias mínimas ambiente e interior de -2°C , 4°C y 18°C respectivamente. Los grados de diferencia entre t_i y t_a se han calculado teniendo en cuenta que alrededor del mediodía solar t_i fluctúa entre 23°C y 24°C , lo que produce un aumento en las horas de sol. Esto conduce a un resultado de 100°C en este intervalo y 245°C en el resto del día, lo que da un total diario de 345°C .

Las pérdidas por el piso se han supuesto pequeñas (y por consiguiente despreciables), dado que el mismo está aislado y en general se admite que el suelo en la zona central de la vivienda está sólo algunos grados por debajo de t_i . Sin embargo deberá profundizarse este estudio ya que la tierra que lo compone es bastante húmeda (lo que aumenta sensiblemente su difusividad térmica) y las pérdidas laterales pueden ser importantes al estar la vivienda sobreelevada y existir una piscina en las cercanías.

Para evaluar la contribución a las pérdidas térmicas por las renovaciones de aire, que en recintos con paredes aisladas puede ser el factor principal de pérdidas térmicas, se ha empleado el "método de las rendijas" (6).

El detalle general del resto de las pérdidas, así como de las ganancias térmicas se describe en la Tabla I. En lo referente a estas últimas, se observa que si bien los muros abarcan una mayor superficie de la pared Norte, la menor eficiencia de los mismos respecto a la de las ventanas (que es de 0,55) determina una contribución menor al total de energía solar captada.

Dado que la zona de ganancia directa tiene particularidades específicas que la diferencian de los demás colectores, se detalla a continuación los puntos que se han tenido en cuenta para el cálculo :

- Radiación solar en día de cielo claro: directa, difusa de cielo y reflejada de piso.
- Reflexión en el vidrio
- Transmitancia de árboles vecinos, a la radiación de cielo
- Transmitancia del tejido mosquitero ubicado en la porción inferior de la ventana y de la carpintería metálica
- Factor de sombra por mochetas y aleros
- Pérdidas hacia el exterior de parte de la radiación de onda corta por reflexiones
- Pérdidas térmicas durante las horas de sol (con vidrio solamente) y en el resto del día (con cortina de enrollar, vidrio y cortina americana interior).

La eficiencia de las ventanas puede aún mejorarse, aumentando la transmitancia total de la radiación solar a través de la misma disminuyendo las pérdidas nocturnas.

Si bien el acuerdo obtenido entre las energías recibida y perdida es bueno, debe señalarse que existen indeterminaciones importantes en la evaluación de cada término (que puede llegar a ser de varios por cientos en la mayoría de los casos), lo que estaría indicando una compensación de errores al obtenerse el resultado final. Se estima que las ganancias y las pérdidas están dadas con su error relativo porcentual de aproximadamente un 25 %.

4. Ensayo del muro colector-acumulador

A los efectos de estudiar el comportamiento del muro colector-acumulador de la vivienda Sol 55, en forma independiente de las demás componentes (ventana de ganancia directa, aislación del techo, inercia térmica del conjunto, etc), se lo sometió a ensayo en el módulo descrito en (7).

El muro, pintado de negro mate y en contacto directo con el medio exterior, está construido con los mismos materiales y con similar disposición que en la situación real, regulándose la temperatura de la cara interior del recinto alrededor de los $19,5^{\circ}\text{C}$, para simular las condiciones ambientales de la vivienda.

En la Fig. 3 se representa la evolución temporal de las temperaturas t_i y t_a y las correspondientes al interior del muro, sobre un eje (x) perpendicular al mismo y con el origen en la cara expuesta al sol. Estas últimas, indicadas con los números 1 a 7, están equiespaciadas cada 5 cm en el hormigón. En forma paralela se han ubicado otras (que no se representan para no complicar la figura) en la zona donde se tienen dos materiales, hormigón y arena. Esta arena es la que llena los huecos del bloque.

La evolución de estas últimas temperaturas (medidas con el mismo intervalo $\Delta x = 5$ cm), está dentro del grado centígrado respecto de las anteriores, lo que muestra un comportamiento similar de estos materiales. Dada la diferencia existente entre las difusividades térmicas del hormigón y de la arena seca, este resultado puede interpretarse si se tiene en cuenta que la arena utilizada estaba algo húmeda.

La curva 1, correspondiente a la temperatura de la cara exterior, refleja las irregularidades de la radiación solar incidente sobre el muro, las que se propagan y atemperan a medida que se considera un espesor x mayor. La radiación total medida por un solarímetro Kipp & Zonen con integrador en un plano vertical, sin considerar reflexión de la tapa, es de $16,6 \text{ MJ/m}^2$ en el día del ensayo.

Un resultado importante se deduce de la comparación de t_i con la de la cara interna del muro (registro 7): sólo existe aporte de calor efectivo desde el acumulador hacia el recinto al final de la tarde (desde las 3 h hasta las 9,30 h solar). Además el calor almacenado durante las horas de radiación, es entregado en ambas caras hacia el interior y el exterior, produciendo una disminución general de las temperaturas del muro en una proporción de alrededor de $0,5 \text{ }^\circ\text{C/h}$ (intervalo -12h a -6h). La existencia del flujo de calor en ambos sentidos es corroborada por el hecho de que la temperatura máxima interior al muro durante la noche (-12h a -4h), se produce a $x = 20$ cm (registro 5). En el mismo intervalo de tiempo la temperatura (regulada) del interior del módulo está siempre por encima de las del muro y en particular la correspondiente a la cara interna (registro 7). Una posible explicación de este efecto reside en la alta resistencia térmica de la capa límite superficial, que dificulta sensiblemente la transferencia de calor. En una etapa posterior se profundizará el estudio experimental de este fenómeno.

Puede concluirse de este experimento, que en la latitud de Rosario en días de viento y temperatura ambiente moderados y de cielo claro, con alta radiación sobre un plano vertical, una pared captora elemental, si bien tiene un rendimiento de captación superior al de una pared común (pintada de un color con absorbancia bastante inferior a la del cuerpo negro), no es suficiente para mantener por sí sola el confort de un recinto bioclimático.

Con el objeto de elevar la proporción de energía acumulada, disminuyendo las pérdidas hacia el exterior, se realizó otro experimento en un día de cielo claro con radiación total integrada de $19,3 \text{ MJ/m}^2$. Se cubrió el área exterior del muro con un vidrio común de 3 mm de espesor y se adosó al sistema una tapa reflectora que se rebate durante la noche, para aislarlo del medio ambiente. Además, se interrumpió el aporte de calor en el interior del módulo, para analizar esta situación en comparación a una similar en la vivienda.

En la Fig. 4A se muestran los resultados experimentales. En este caso, la temperatura superficial de la cara interior del módulo está siempre por encima de la del aire interior.

Durante el día, al ser de cielo prácticamente claro y al superarse las contribuciones de las radiaciones directas y difusas del entorno, con las reflejadas desde la cubierta reflectora, se logran temperaturas sensiblemente mayores que en el primer ensayo, llegando en algunos casos a duplicarse (registro 1, hacia el mediodía solar). Al no funcionar el regulador y estar el módulo aislado, aunque con posibilidad de intercambio convectivo con el exterior a través de los orificios de entrada y salida del aire, la temperatura t_i sigue de cerca las variaciones de la cara interior del muro.

Durante la noche, al no existir un buen cierre de la tapa (para simular la situación real) las pérdidas hacia afuera son importantes (registro 1 inferior al 2), debido a que la diferencia de temperaturas entre t_a y t_i son relativamente altas (unos 20°C). Por este motivo, la variación temporal del conjunto de temperaturas es de unos $0,9^\circ\text{C/h}$, sensiblemente mayor que la anteriormente descrita. Cabe destacarse que en ambas situaciones t_a es aproximadamente igual en el intervalo -12h a -5h .

En la Fig. 5 se han representado las temperaturas en función del espesor del muro para distintos tiempos, a partir de los datos de la figura anterior. En primera aproximación podría esperarse que la temperatura de la cara externa (registro 1), pueda representarse por la siguiente función armónica simple

$$t = t_0 \cos (\omega z - mx) \quad /1/$$

t_0 : amplitud en $x = 0$

ω : frecuencia angular de la oscilación

$T^* (= 2\pi / \omega)$: período

t : tiempo

α : difusividad del material

$m = (\omega / 2\alpha)^{1/2}$: decremento logarítmico

Considerando a la condición de contorno /1/ como la representación de una excitación térmica sobre la superficie de un sólido semi-infinito de difusividad α y resolviendo la ecuación de conducción del calor, se obtiene la siguiente expresión para la distribución espacio-temporal de las temperaturas del muro (8)

$$t(x, z) = t_0 e^{-mx} \cos (\omega z - mx) \quad /2/$$

De /2/ se deduce que la variación brusca de las curvas correspondientes al entorno del mediodía solar ($\tau = -1\text{h}, 0\text{h}, 1\text{h}$), proviene de un bajo valor de la difusividad térmica del material empleado. Se explica también la forma de las curvas de la Fig. 5 y el amortiguamiento de la excitación para tiempos crecientes ($\tau = 5\text{h}, 9\text{h}$). Puede extraerse además la velocidad de propagación de la excita-

ción, a partir de la evolución de los máximos en el tiempo, tal como se representa en la Fig. 4B. El valor numérico extraído de la primera parte de la curva de pendiente constante es 3,4 cm/h. No se considera representativa la parte no lineal de la curva correspondiente a puntos cercanos a la cara interna. Se observa en dicha zona un aumento de la velocidad de propagación. Este efecto puede deberse principalmente a la proximidad al recinto con temperatura inferior al muro. Sin embargo, todo el análisis teórico anterior debe considerarse como cuantitativo, ya que la excitación no es simétrica respecto del mediodía solar (curvas de $Z = -1h, 0h$ y $1h$) y fundamentalmente no se cumple la condición básica impuesta para la validez de este modelo elemental (8). La misma establece que el espesor del sólido conductor del calor debe ser al menos de una longitud de onda λ . Dado que $\lambda = vZ^*$, en el presente caso resulta $\lambda = 32$ cm, que es casi tres veces mayor que el espesor del muro.

El problema radica en que las temperaturas no se han amortiguado lo suficiente como para suponer que la dimensión finita del sólido no afecta el análisis. Así, con $\lambda = 32$ cm, el amortiguamiento en $x_{mx} = 30$ cm es sólo del 10 % mientras que si x_{mx} fuera igual a λ , resultaría ser del 0,2 %, suficientemente pequeño como para suponer válido el modelo.

Una estimación del aporte total de calor del muro durante el día del ensayo, se logra evaluando $\frac{\partial T}{\partial x}|_{x=30}$ a partir de los datos experimentales. Para ello se toman los registros de las termocuplas 6 y 7 colocadas a $x = 25$ cm y $x = 30$ cm respectivamente. Esta aproximación se considera razonable, dada la poca variación de pendiente de las curvas de temperatura en el intervalo considerado (ver Fig. 5).

La conductividad del material del bloque, de densidad $\rho = 2200$ kg/m³, es (según tablas) $k = 1,74$ W/m °C.

En la tabla II se dan valores típicos de la evolución temporal del flujo de energía por unidades de área y de tiempo $q = -k(\Delta T/\Delta x)$ a través de la cara interna del muro. La fluctuación del mismo está en relación directa con el aporte solar y el retardo térmico. El mínimo flujo se produce durante la noche.

Tabla II. Flujos de calor desde el muro hacia el recinto a lo largo del día.

τ (h)	- 12	- 6	0	6	12
q (W/m ²)	78	44	87	125	60

La integración del flujo durante las 24 hs da el valor $E' = 7$ MJ/m².

La radiación total captada por el muro, E_T , puede obtenerse sumando la radiación global del día medida sobre un plano Norte y la proveniente de la tapa reflectora, estimada en un 10 % de la anterior.

Relacionando los valores E' y E_T se tiene para el rendimiento diario del muro captor el valor estimativo 0,33. Para una determinación de mayor precisión deberá considerarse el análisis más elaborado realizado en (7).

5. Conclusiones y perspectivas futuras

El presente trabajo describe las innovaciones introducidas en la vivienda Sol 55. Se ha conseguido aumentar sensiblemente la cantidad de energía captada, reduciéndose al mismo tiempo las pérdidas. Del balance energético invernal puede obtenerse información sobre las mayores contribuciones a la ganancia o pérdida de energía. Además, el ensayo independiente del muro colector-acumulador, posibilita determinar los flujos de calor hacia el interior de un recinto bioclimático.

En una etapa posterior se evaluará la prestación de la vivienda en período estival, se construirá una ampliación (Fig. 1), se ensayará con mayor detalle el muro inhomogéneo y se simulará la evolución de las temperaturas en su interior, solucionando la ecuación de conducción del calor con condiciones de contorno dadas en ambas caras del sólido.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los restantes miembros del Grupo de Energía Solar. La colaboración técnica de M.C. Vozzi, C. Carman, M. y A.M. Di Bernardo y del personal técnico-administrativo del Observatorio Astronómico Municipal de Rosario es altamente apreciada.

Referencias

1. E. Di Bernardo, R. Gaspar y R. D. Piacentini. Experimentación de una vivienda solar con ganancia directa y acumulación de calor. 4ª Reunión de ASADES- La Plata, 1978.
2. E. Di Bernardo, R. Gaspar y R. D. Piacentini. Estudio comparativo de la vivienda Sol 55 durante dos períodos invernales. 5ª Reunión de ASADES- Córdoba, 1979.
3. E. Di Bernardo, R. Gaspar y R. D. Piacentini. Experiments on a solar house in a humid-temperate climate. 18 Recontre Internationale de la Complex, Milan, Italia, 1979.
4. J. D. Balcomb. Designing passive solar buildings to reduce temperature swings. Abstracts International Congress ISES,

- Atlanta, EUA, 1979.
5. D. Verger, G. Arino, L. Machado, R. D. Piacentini y E. Di Bernardo. Proyecto de edificio para laboratorio experimental de energía solar. Comunicación presentada en la 6ª Reunión de Trabajo de ASADES, Catamarca, 1980.
 6. Manual de aire acondicionado Carrier. Boixareu Editores, Barcelona, España, 1978.
 7. J. J. Elicabe Urriol. Ensayo y modelización de muros colectores-acumuladores de energía solar. Trabajo Especial para optar al título de Licenciado en Física, Escuela de Física, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, U. N. Rosario, 1980.
 8. H. S. Carlaw y J. C. Jaeger. Conduction of heat in solids. Oxford University Press, Gran Bretaña, 1975.

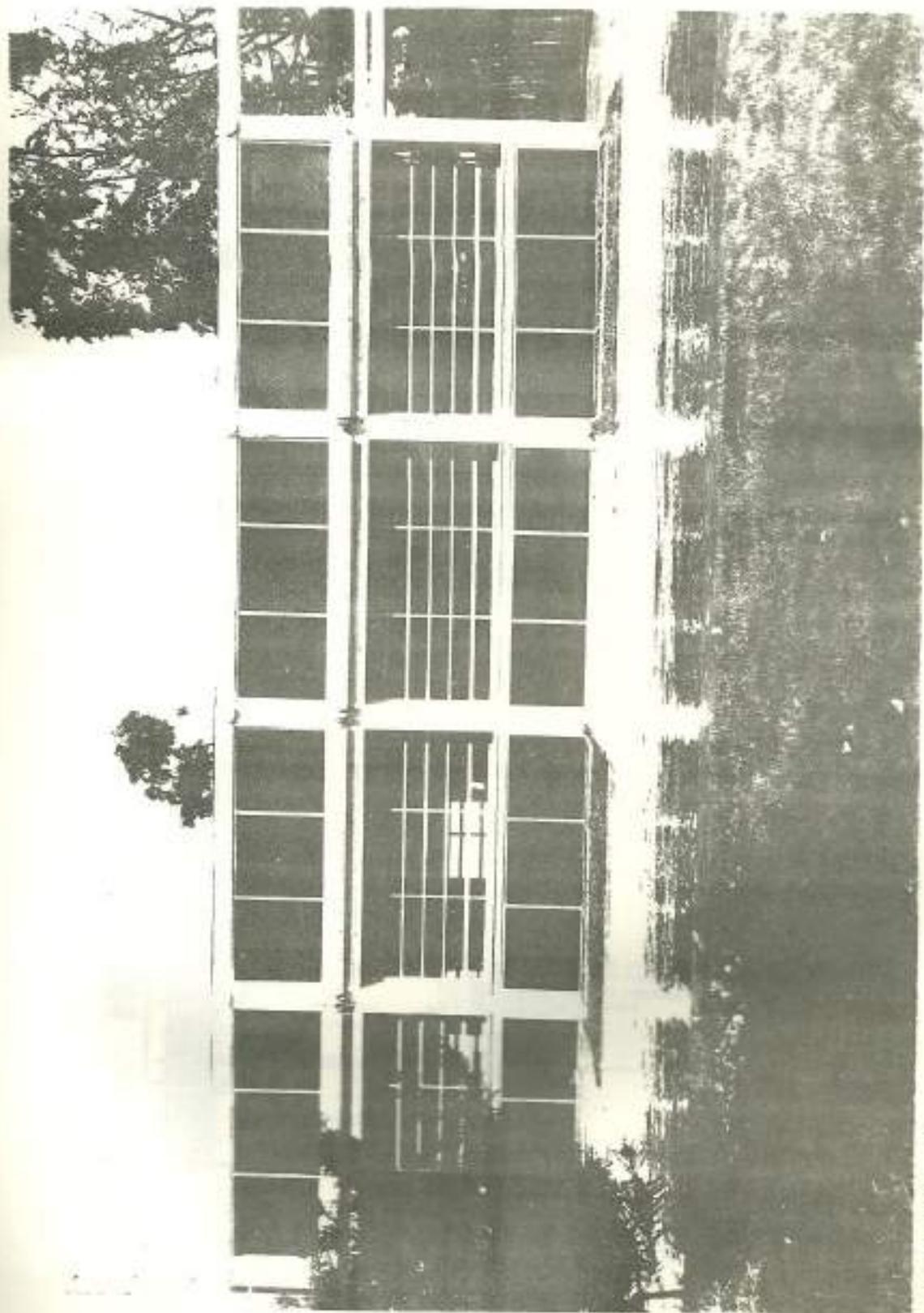


FIGURA 1'

SOL 55

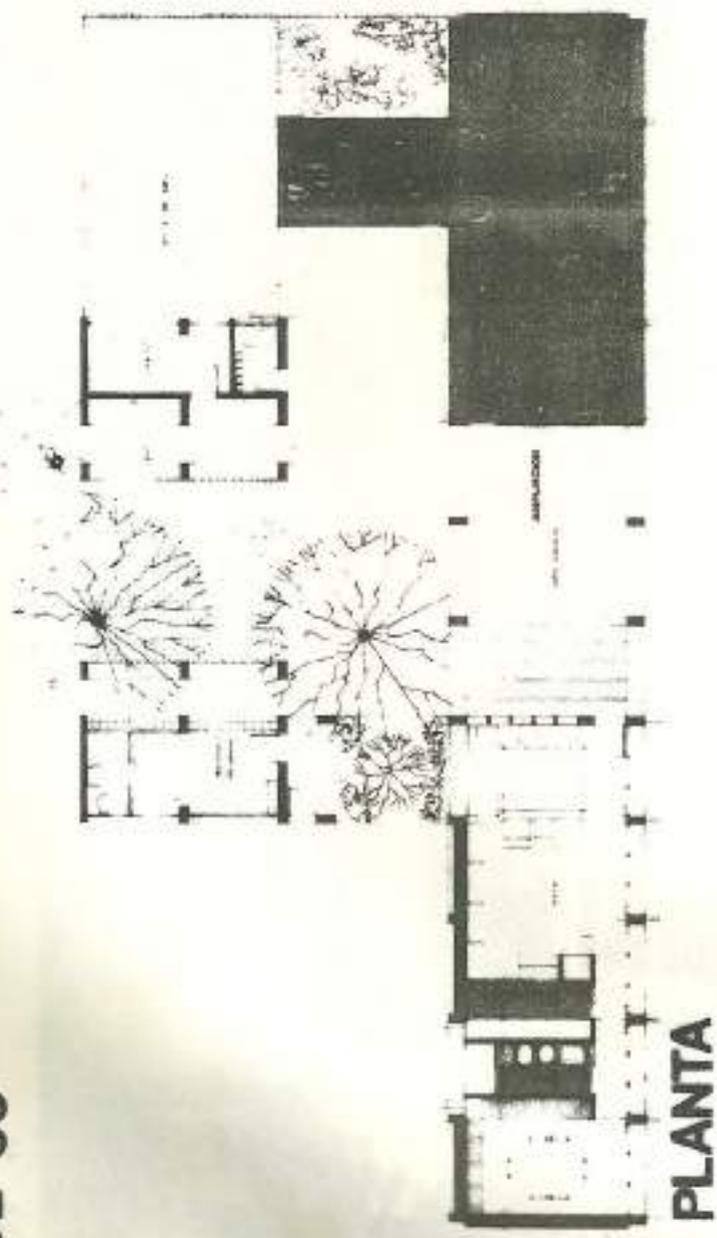
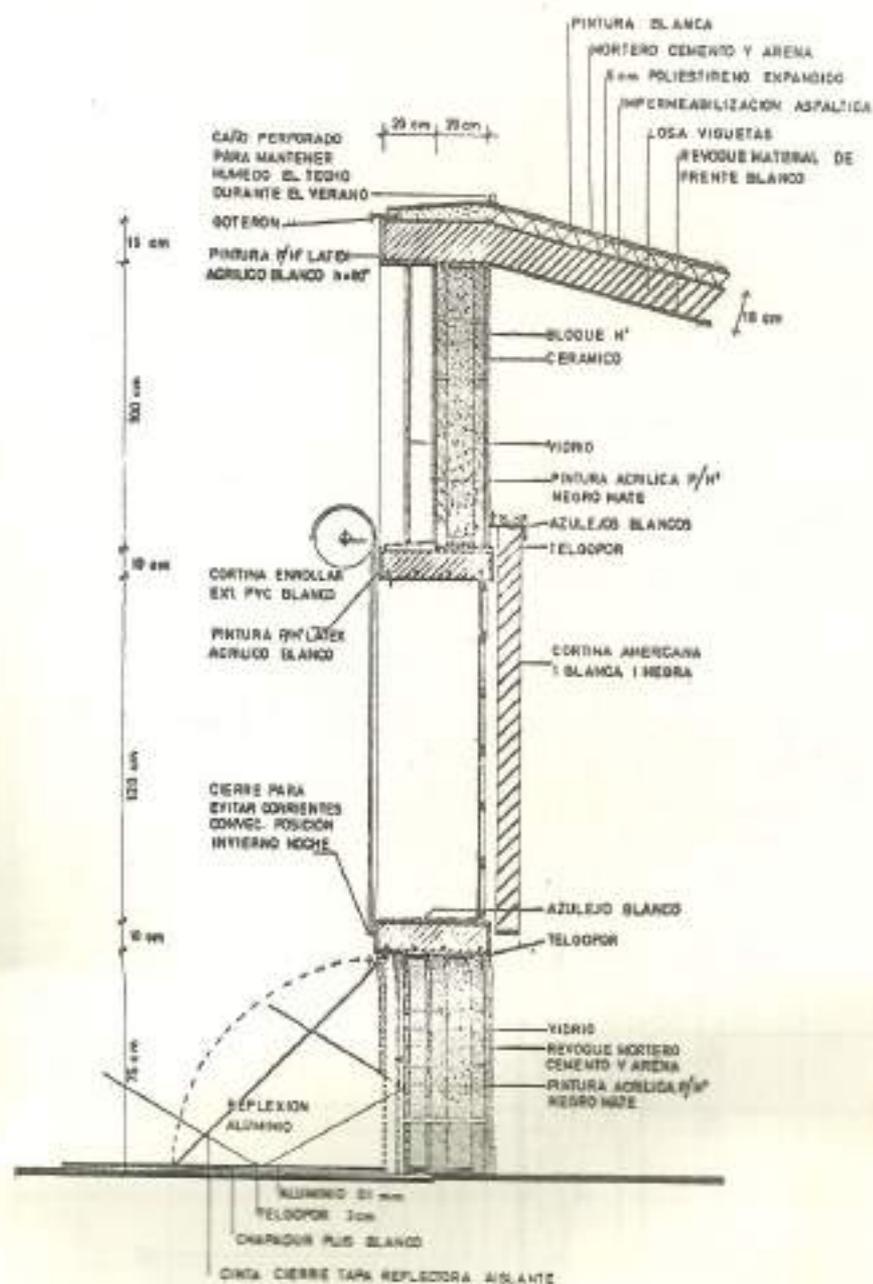


FIGURA 1^ª

SOL 55



CORTE FRENTE NORTE

FIGURA 2

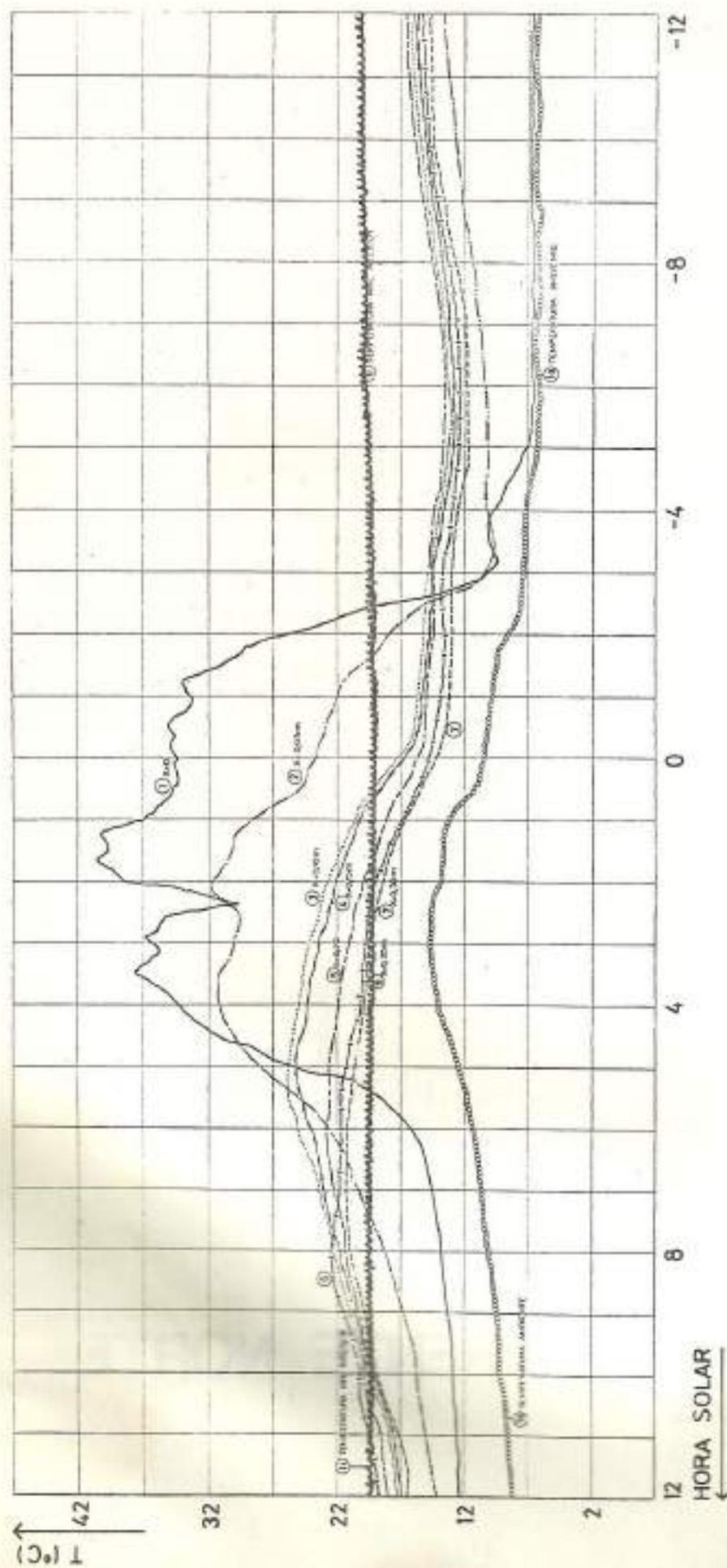


Figura 3. Registros de temperaturas correspondientes al ensayo del muro sin vidrio y con temperatura del interior del módulo regulada.

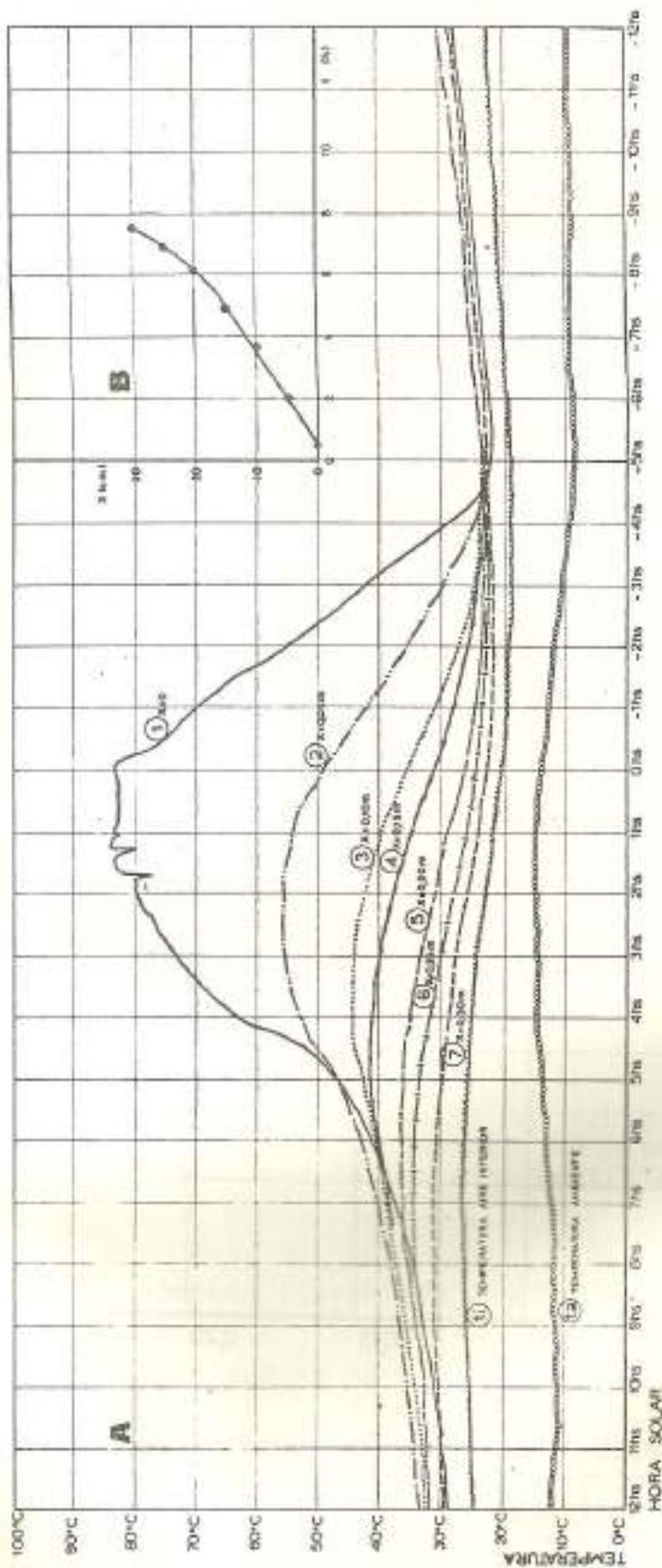


Figura 4. A) Registros de temperaturas correspondiente al ensayo del muro con vidrio y tana reflectora. B) Máximas de temperatura para distintos espesores en función del tiempo.

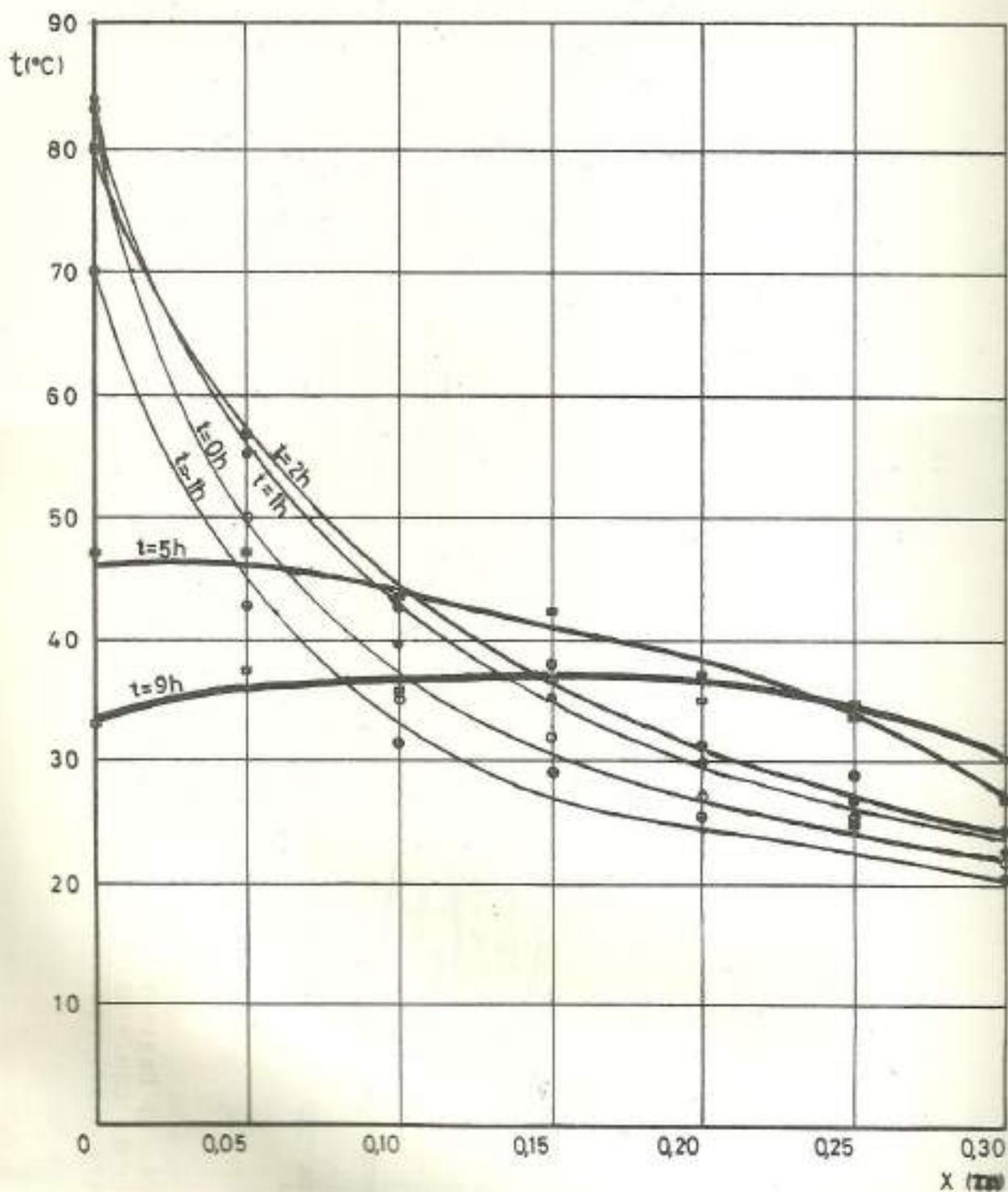


FIGURA 5. Variaciones de temperatura en función del espesor del muro colector-acumulador (con vidrio y tapa reflectora) para distintos tiempos.