

# MEDICION Y MODELIZACION DE UNA VIVIENDA SOLAR PASIVA EN PERIODO INVERNAL EN ROSARIO (ARGENTINA)

Rubén D. Piacentini<sup>\*+</sup> y Marcelo Sepliarsky<sup>\*</sup>

## RESUMEN

Se presentan los resultados de las mediciones de las temperaturas de las paredes y piso efectuadas con la técnica de termometría infrarroja y del aire interior y exterior, de la vivienda solar Florida Norte, Rosario, Argentina. Estos datos del período invernal 1993 se comparan con los obtenidos empleando el modelo SIMEDIF modificado, lograndose un razonable acuerdo entre ambos. Se describen, además, los flujos energéticos correspondientes al comportamiento de la vivienda en diferentes situaciones (reducción de las renovaciones de aire y aumento de la aislación en las ventanas), obteniendose conclusiones al respecto.

## VIVIENDA

La vivienda se encuentra ubicada en Rosario ( $32^{\circ}55'S$ ,  $60^{\circ}44'W$ ), Argentina. Está construida en dos plantas: la planta baja está completamente interconectada a través de espacios abiertos que permiten facilmente el paso del aire entre

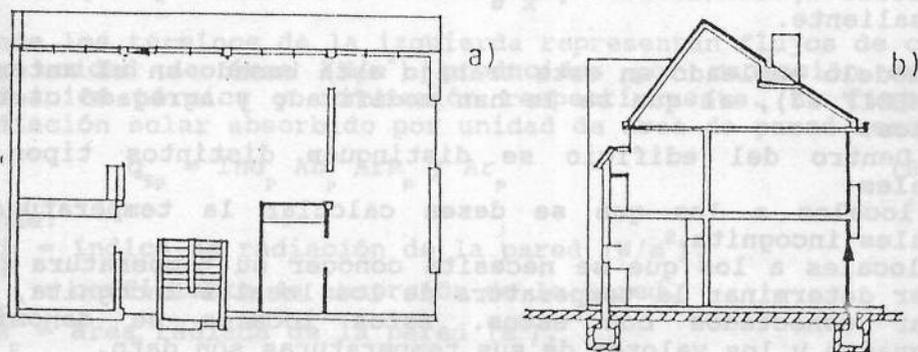


Fig 1: Representación esquemática de la vivienda a) Planta baja investigada (Norte hacia arriba) y b) corte vertical (Norte hacia la derecha)

\* Grupo de Energía Solar, Instituto de Física Rosario (CONICET-UNRosario); Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNRosario).

+ Observatorio Astronómico de Rosario, CC 606, Parque Urquiza, 2000 Rosario, Argentina.

cocina, comedor, living y escritorio; la alta está destinada a dormitorios. Al presente se encuentra habitada, lo que permite estudiarla en situación de uso real y obtener una evaluación complementaria (a través de los ocupantes) del confort bioclimático interior. Posee una amplia zona de captación solar pasiva, a través del plano vidriado Norte, con módulos de 3m x 2m. Encima de los mismos se extiende una franja de manpostería de 8cm de hormigón (lado interior) y ladrillos vistos. El piso, diseñado para acumular calor, está construido con hormigón de alta densidad, de 25 cm de espesor y recubierto con cerámicos. Las paredes exteriores Este, Sur y Oeste son de doble hilera de ladrillos vistos, con la separación entre ambas hileras sin puentes térmicos y rellena con placas de 4 cm de espesor de espuma aislante expandida, barrera de vapor y cámara de aire de 1 cm de espesor promedio. Las aberturas hacia el Sur, Este y Oeste son pequeñas, para minimizar las pérdidas de calor invernales y las ganancias estivales.

### MODELO

En el modelo SIMEDIF [1, 2] se considera como edificio al local o conjunto de locales a los que se pretende calcular la temperatura. Este edificio tiene como límite al ambiente exterior, cuya temperatura se supone conocida. Los locales pueden estar interconectados entre sí y/o con el exterior y estar conformados por distintos elementos (paredes, puertas, ventanas, etc). Denominando con el subíndice  $i$  a cada local y con  $j$  al número del elemento que transmite calor se plantea que la suma de los flujos para cada local sea nula:

$$\sum Q_{j,i} = 0 \quad (1)$$

donde  $Q_{j,i}$  representa el flujo de calor entre el elemento  $j$  y el local  $i$ , considerado positivo si es entrante y negativo si es saliente.

El modelo empleado en este trabajo está basado en el anterior (SIMEDIF 87), al que se le han modificado y agregado ciertos puntos:

1) Dentro del edificio se distinguen distintos tipos de locales

- locales a los que se desea calcular la temperatura o locales incognita.

- locales a los que se necesita conocer su temperatura para poder determinar la temperatura de los locales incognita, por estar conectados con estos. Estos locales se denominan asignados y los valores de sus temperaturas son dato.

- locales que no se encuentran conectados con los locales incognita y, por lo tanto, no intervienen en la simulación.

2) Se incluye el aporte de calor por fuentes externas (estufas).

$$Q = 4186 P_{ex} / 3600 \quad (2)$$

donde  $P_{ex}$  es el poder calorífico de la fuente dado por el fabricante (kcal/h).

3) Se modifica el cálculo de la temperatura en las paredes (donde se incluyen pisos y techos) teniendo en cuenta intercambios por radiación térmica. El flujo de calor de la pared p al local i resulta:

$$Q = h_{cp} Ar_p (T_p - T_L(i)) \quad (3)$$

donde:

$h_{cp}$  = coeficiente de convección entre la pared p y el local i (W/m<sup>2</sup>C)

$Ar_p$  = área de la pared (m<sup>2</sup>).

$T_p$  = temperatura de la superficie de la pared p (C)

$T_L(i)$  = temperatura del local i (C).

Para determinar la temperatura de cada pared se resuelve la ecuación de conducción del calor unidimensional para cada una de las capas que la constituyen:

$$\frac{\partial T_{pq}}{\partial t} = \frac{k_{pq}}{\rho_{pq} c_{pq}} \frac{\partial T_{pq}^2}{\partial x^2} \quad (4)$$

donde:

$T_{pq}$  = temperatura de la capa q de la pared p (C)

$k_{pq}$  = conductividad térmica (W / m C)

$\rho_{pq}$  = densidad (kg / m<sup>3</sup>)

$c_{pq}$  = capacidad calorífica (J / kg C)

$t$  = tiempo (s)

$x$  = variable espacial (m)

Si la superficie de la capa está en contacto con el aire de un local se plantea la siguiente condición de borde:

$$q_{Sp} + q_{Tp} + q_{Cp} = - k_{pq} \frac{\partial T_{pq}}{\partial x} \quad (5)$$

donde los términos de la izquierda representan flujos de calor por unidad de área (W/m<sup>2</sup>) producidos por radiación solar, radiación térmica y convección respectivamente. El flujo de radiación solar absorbido por unidad de área de pared resulta:

$$q_{Sp} = \text{Ind}_p Ab_p ArR_p / Ar_p \quad (6)$$

donde:

$\text{Ind}_p$  = índice de radiación de la pared (W/m<sup>2</sup>).

$Ab_p$  = coeficiente de absorción de la pared.

$ArR_p$  = área radiada de la pared (m<sup>2</sup>).

El flujo por radiación térmica viene dado por:

$$q_{Tp} = \sigma R (T_{sup}^4 - T_{pq}^4) \quad (7)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman, R es el coeficiente de radiación entre las superficies interactuantes y  $T_{sup}$  representa la temperatura de la superficie con la que la pared intercambia radiación. El flujo de calor por convección resulta:

$$q_{cp} = h_{cp} [T_L(i) - T_{pq}] \quad (8)$$

Si la superficie de la capa es interna, lo que implica está en contacto con la superficie de otra capa, se plantea la continuidad del flujo en la interface:

$$k_{pq} \frac{\partial T_{pq}}{\partial x} = k_{pq+1} \frac{\partial T_{pq+1}}{\partial x} \quad (9)$$

La ecuación (4) con las condiciones de borde (5) y/o (9) se resuelve para cada capa de la pared por el método de diferencias finitas en un esquema explícito [3].

4) Se contempla la posibilidad de que cierta porción de la radiación solar que ingresa a un local vaya directamente al aire [4], según la expresión

$$Q = \sum_p n_i \text{Ind}_p \text{ArR}_p \quad (10)$$

donde  $n_i$  indica la proporción de la radiación que va al aire del local

5) En el intercambio a través de las superficies vidriadas se considera la radiación solar absorbida por estas superficies. El flujo de calor de la ventana al local  $i$  resulta:

$$Q = h_{vi} \text{Ar}_v (T_v - T_L(i)) \quad (11)$$

donde:

$h_{vi}$  = coeficiente de convección entre el vidrio y el local  $i$   
(W / m<sup>2</sup>C)

$\text{Ar}_v$  = área de la ventana (m<sup>2</sup>)

$T_v$  = temperatura de la ventana (C)

Para determinar la temperatura de la ventana se considera la radiación solar absorbida por esta superficie:

$$T_v = (h_{vi} T_L(i) + h_{vj} T_L(j) + q_{sv}) / (h_{vi} + h_{vj}) \quad (12)$$

donde  $q_{sv}$  es la radiación solar absorbida por la ventana (W/m<sup>2</sup>).

## RESULTADOS

Las mediciones se realizaron en período invernal (junio a agosto de 1993) empleando: termografía infrarroja (equipo Spot IR Minolta Land Compac 3) para registrar temperaturas a distancia de pisos, techos y de todas las paredes exteriores e interiores, termómetros convencionales y sensores de la estación meteorológica automática Davis para el aire interior y exterior y su humedad relativa; equipo Kipp y Zonen con integrador para registrar intensidad de radiación solar. Las mayores indeterminaciones en las temperaturas de las paredes (estimadas dentro de 1 C), son debidas al hecho de que los resultados presentados son valores promedios tomados en distintos sectores. El termómetro IR se empleó con emitancia  $\epsilon=0.85$  y las temperaturas obtenidas se corrigieron con el método de calibración descrito en [5]. Cabe destacarse que en la mayor parte del rango medido (10 C a 20 C) las diferencias

no exeden de 1 C.

La simulación se llevó a cabo para un período de 20 días (desde el 14/7 al 2/8 de 1993), considerando valores horarios medidos de la temperatura del aire exterior y de la planta alta, así como los de la radiación solar. Se analizó el comportamiento térmico de la planta baja como un único local, por la gran interconexión entre los distintos sectores.

En la figura 2 se presentan datos de radiación solar y temperaturas del aire exterior e interior para un día típico de cielo claro (1/8/93). En particular, esta última se compara con la obtenida con el modelo SIMEDIF modificado. En las figuras 3 a 5 se presentan resultados de las mediciones con el termómetro infrarrojo, de las temperaturas superficiales del piso y exterior e interior de las paredes O y S.

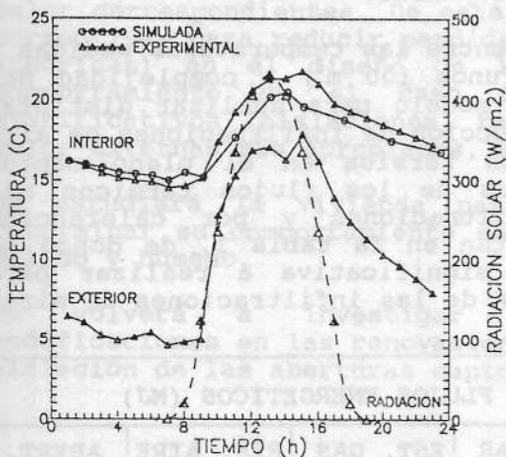


Fig. 2: Temperatura del aire y radiación solar

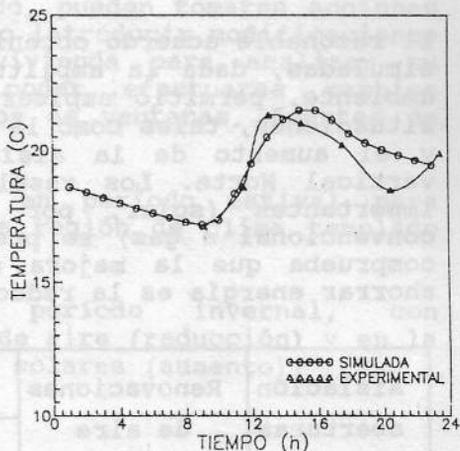


Fig. 3: Temperatura del piso

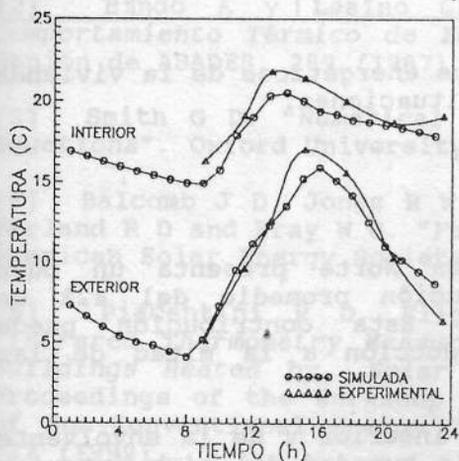


Fig. 4: Temperatura de la pared Oeste

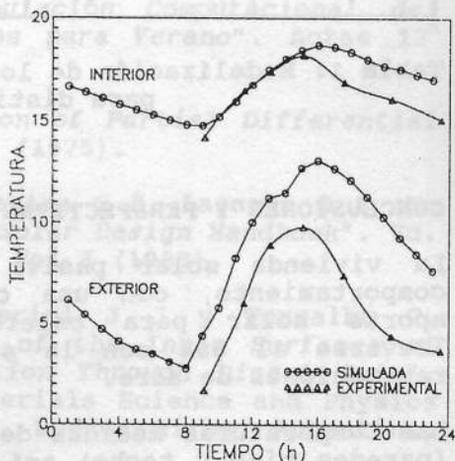


Fig. 5: Temperatura de la pared Sur

Se comprueba que, en general, el modelo describe razonablemente bien la evolución temporal de las temperaturas, salvo el caso de la correspondiente a la cara exterior de la pared Sur, donde se observa una desviación sistemática. La predicción de valores superiores por el modelo respecto de las mediciones se debe, muy probablemente, a que en esta simulación se considera una temperatura uniforme para todo el medio ambiente exterior, mientras que en la situación real se ha verificado la existencia de un microclima con menor temperatura. Un estudio más detallado de este fenómeno será realizado en el próximo período invernal.

Cabe destacarse que, a pesar que sobre la pared oeste incide radiación solar durante parte del día, su temperatura superficial no excede en ningún momento la del aire interior, por lo que el flujo de calor es siempre negativo. De este resultado se deduce la importancia de una buena aislación de la envolvente en las áreas no captoras.

El razonable acuerdo obtenido entre las temperaturas medidas y simuladas, dada la amplitud (unos 100 m<sup>2</sup>) y complejidad del ambiente, permitió emplear el modelo para analizar distintas situaciones, tales como la reducción de infiltraciones de aire y el aumento de la aislación térmica en el plano captor vertical Norte. Los resultados de los flujos térmicos más importantes (solar, por infiltraciones y por calefacción convencional a gas) se presentan en la tabla 1, de donde se comprueba que la mejora más significativa a realizar para ahorrar energía es la reducción de las infiltraciones de aire.

Aislación aberturas	Renovaciones de aire	FLUJOS ENERGETICOS (MJ)			
		SOLAR	EST. GAS	REN. AIRE	ABERT.
normal	normal	315	432	-408	-70
normal	mitad	315	172	-187	-66
doble	normal	315	345	-381	-16

Tabla 1: Modelización de los flujos energéticos de la vivienda para distintas situaciones.

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La vivienda solar pasiva Florida Norte presenta un buen comportamiento, con una contribución promedio del 42% de aporte solar para calefacción. Esta contribución puede llevarse al 65% con la sola reducción a la mitad de las renovaciones de aire.

Las temperaturas medidas del aire interior y de la envolvente (paredes piso y techo) así como la humedad del aire interior (que fluctúa, en promedio, entre el 35% y 60%), muestran un alto confort bioclimático. En particular las temperaturas

interiores de las paredes no difieren en más de 5 C del aire interior, por lo que no se produce sensación de incomodidad, por flujo neto radiante excesivo entre las personas y la envolvente.

Los flujos netos de pérdida de calor indican que la mayor contribución está dada por las renovaciones de aire. Esto es debido al tipo de aberturas del frente Norte (con estructura de hierro), las cuales se modificarán para reducir dichas pérdidas al mínimo compatible con una adecuada aireación.

El método de Termografía Infraroja es particularmente apropiado para medición a distancia de superficies (paredes, piso, techo, etc.), si se poseen curvas de calibración para cada material como en el presente caso.

El modelo teórico empleado (SIMEDIF MODIFICADO) permite representar razonablemente bien la evolución temporal de las temperaturas interiores y exteriores y, evaluar los flujos de calor correspondientes. De este modo, pueden tomarse acciones correctivas para reducir pérdidas, o introducir modificaciones (teóricas) en el diseño de la vivienda para analizar su comportamiento en el caso de poder efectuarse cambios significativos (aislaciones, tamaños de ventanas, fuentes de calor externas más apropiadas, etc).

Se estudiará la vivienda pasiva en período estival para determinar su comportamiento en una región de clima templado cálido y húmedo.

Se volverá a investigar en período invernal, con modificaciones en las renovaciones de aire (reducción) y en la aislación de las aberturas captoras solares (aumento).

## BIBLIOGRAFIA

[1] Casermeiro M y Saravia L. "Cálculo Térmico Horario de Edificios Solares Pasivos". Actas 9ª Reunión de ASADES, 39 (1984).

[2] Bindo A y Lesino G. "Simulación Computacional del Comportamiento Térmico de Edificios para Verano". Actas 12ª Reunión de ASADES, 289 (1987)

[3] Smith G D. "Numerical Solution of Partial Differential Equations". Oxford University Press (1975).

[4] Balcomb J D, Jones R W, Kosiewicz C E, Lazarus G S, Mc Farland R D and Wray W O. "Passive Solar Design Handbook". Ed. American Solar Energy Society, Inc. Vol 3 (1983).

[5] Piacentini R D, Eliçabe Urriol J J y Torralba C. "Infrared Thermometry Measurements of the Inner Surfaces of Buildings Heated by Solar Radiation Through Direct Gain". Proceedings of the Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Buenos Aires, Argentina, 437 (1992).