

MONITOREO Y SIMULACIÓN TÉRMICA DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES DE PAREDES¹

S. Flores Larsen², C. Filippín³ y G. Lesino³.

INENCO - Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales – U.N.Sa. - CONICET
Universidad Nacional de Salta
Avda. Bolivia 5150 – CP 4400 – Salta Capital - Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax 0387-4255489 e-mail: seflores@unsa.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presentan los resultados del monitoreo y simulación de temperaturas superficiales de envolventes del conjunto de residencias estudiantiles de la ciudad de Santa Rosa, construidas por la Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. Se estudió el comportamiento térmico transitorio de los muros norte y sur y de la cubierta horizontal, para lo cual se monitorearon las temperaturas superficiales exteriores e interiores, la temperatura de los locales del edificio en contacto con dichas envolventes y las condiciones climáticas exteriores (temperatura ambiente y radiación solar sobre superficie horizontal). La simulación de los datos experimentales se realizó mediante una opción especial del programa *SIMEDIF para Windows*, que calcula las temperaturas superficiales de paredes a partir de los datos geométricos y constructivos del edificio, de las propiedades termofísicas de los materiales, de las condiciones meteorológicas y del lugar de emplazamiento del mismo. Se compararon los resultados del monitoreo y de la simulación térmica y se analizó el comportamiento térmico de la envolvente.

Palabras clave: simulación térmica, edificios, acondicionamiento bioclimático.

INTRODUCCIÓN

Las residencias universitarias bioclimáticas estudiadas están localizadas en la ciudad de Santa Rosa, capital de la provincia de La Pampa, ubicada a 189m de altura sobre el nivel del mar, 36.6° de latitud sur y 64.27° longitud oeste. El edificio posee seis departamentos para cuatro estudiantes cada uno (Figura 1). Los departamentos 1, 2 y 3 se encuentran en la planta baja (este, centro y oeste, respectivamente), mientras que los departamentos 4, 5 y 6 se encuentran en la planta alta. El edificio, másico y aislado térmicamente, cuenta con acondicionamiento pasivo a través de áreas transparentes al norte para el calentamiento durante el invierno, mientras que la ventilación natural favorece el refrescamiento pasivo en verano. En los trabajos de Filippín *et al.* (2001, 2002a, 2002b), se describen más detalladamente el diseño y la tecnología adoptada en la construcción de las residencias, se estudia el consumo de energía auxiliar en invierno y se describe el comportamiento térmico de verano del mismo, a partir del monitoreo de las temperaturas de los distintos ambientes del edificio.

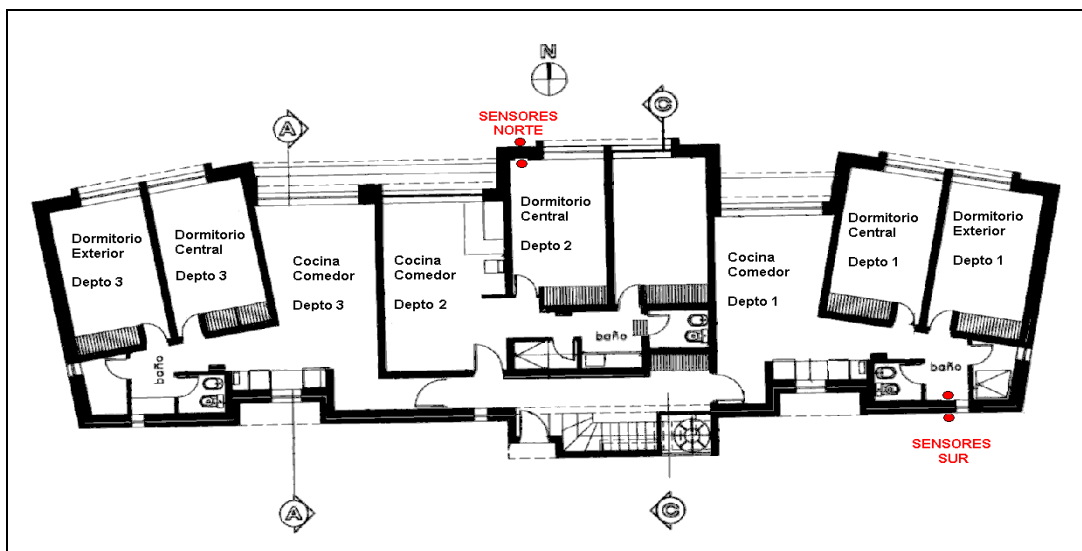


Figura 1: Vista en planta del edificio y ubicación de los sensores de temperatura sobre muros norte (planta baja) y sur (planta alta).

¹ Trabajo financiado por ANPCYT PICT 2000 N°13-09991 y por CIUNSa N°1088.

² Becaria de CONICET.

³ Investigadora de CONICET.

En la Figura 2 se puede observar el detalle constructivo de uno de los muros exteriores y de la cubierta. Las paredes exteriores del edificio están constituidas por ladrillo de 0.18m de espesor, 0.05m de poliestireno expandido como aislante térmico y una protección exterior de ladrillo cerámico. Dichas paredes han sido pintadas con la misma pintura color amarillo claro. La cubierta está constituida por losa cerámica con membrana hidrófuga aluminizada, barrera de vapor y poliestireno expandido de 0.07m de espesor. Se utilizó hormigón de perlita de 0.1m de espesor para mejorar la resistencia térmica de la cubierta, el cual sirvió de base sólida para la colocación de la membrana hidrófuga.



Figura 2. Vista de la composición de los muros exteriores (1: ladrillo macizo; 2: poliestireno expandido; 3: ladrillo cerámico) y de la cubierta del edificio.

En este trabajo se presentan los resultados del comportamiento térmico transitorio de los muros norte y sur y de la cubierta horizontal del edificio. La simulación de los datos experimentales se realizó mediante una opción especial del programa *SIMEDIF para Windows*, que calcula las temperaturas superficiales de paredes a partir de los datos geométricos y constructivos del edificio, de las condiciones meteorológicas y del lugar de emplazamiento del mismo.

MONITOREO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE MUROS Y DE LA CUBIERTA

El monitoreo se inició el 13 de diciembre de 2000. Los datos analizados en este trabajo corresponden al periodo comprendido entre el 23 y el 31 de diciembre, en que el edificio completo estuvo desocupado debido al receso de verano. Las mediciones se realizaron cada 10 minutos mediante termocuplas ubicadas en las superficies interior y exterior de un muro norte (dormitorio central del departamento 2) y de un muro sur (baño del departamento 4), la temperatura exterior de la cubierta, las temperaturas de los locales en contacto con los muros y cubierta estudiados y las condiciones climáticas exteriores (temperatura ambiente e irradiación solar sobre superficie horizontal). En la Fig. 1 se pueden observar los círculos correspondientes a la ubicación de los sensores de temperatura sobre las paredes.

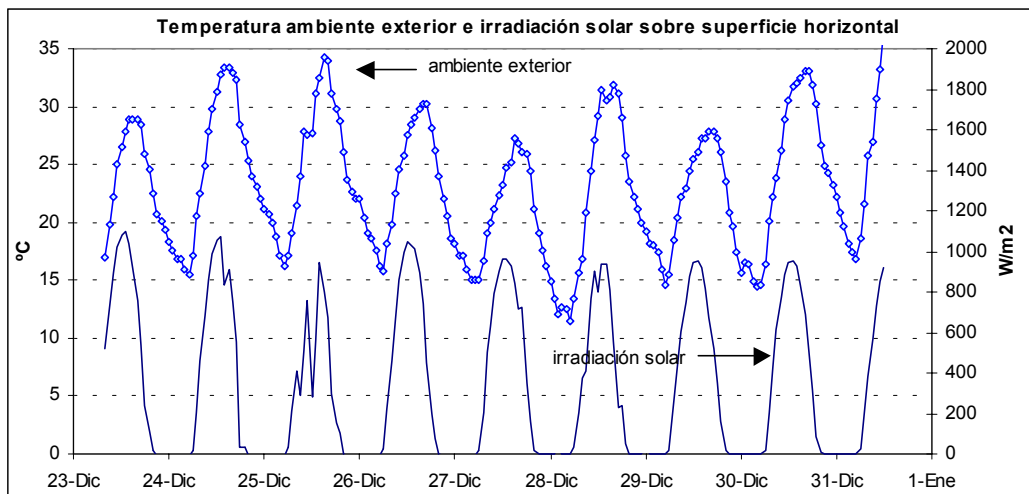


Figura 3: Temperatura ambiente exterior e irradiación solar sobre superficie horizontal horarias para el periodo de estudio.

Los resultados del monitoreo térmico se pueden analizar en las Figuras 3 a 6. El periodo se caracterizó por temperaturas ambientes elevadas e irradiación sobre superficie horizontal del orden de 900 W/m^2 , con temperaturas máximas de alrededor de 30.5°C y mínimas de 15°C (Fig. 3). Una inspección global de los resultados permite observar que las temperaturas de las superficies exteriores de las paredes en general no superan la temperatura exterior, mientras que la temperatura de la cubierta se ubica en todo el periodo por encima de la misma, con una media 3.2°C más alta que la media exterior. Esto se debe a que en verano la irradiación solar absorbida por la cubierta horizontal es mayor a la recibida por los muros orientados hacia el norte y hacia el sur. Este calentamiento de la cubierta contribuye a aumentar la temperatura de los departamentos de la planta

alta, como se analizó en el trabajo de Filippín *et al.* (2002c). La temperatura interior del techo no se monitoreó directamente, con lo que se simuló mediante *SIMEDIF para Windows* para tener idea de su comportamiento térmico. La simulación (Fig. 10) indica que dicha temperatura no presenta grandes variaciones diurnas-nocturnas. Durante los cuatro primeros días la superficie interior del techo aumentaría lentamente desde 22°C a 24°C, manteniéndose en esta temperatura el resto del periodo. Es interesante comentar que temperaturas elevadas en el techo contribuyen a aumentar la incomodidad en el local, debido a que aumenta la asimetría de temperatura radiante (MRT, 2004). La temperatura radiante es la temperatura de las superficies con las que el cuerpo humano intercambia calor radiante. El cálculo de la temperatura media radiante involucra el conocimiento de las temperaturas de todas las superficies del local, de los factores de vista, de la posición de la persona, etc. En este caso particular, las temperaturas medias de las superficies interiores se ubican alrededor de los 23.5°C, con lo que no existiría una asimetría de temperatura radiante muy marcada que influyera negativamente en el confort térmico.

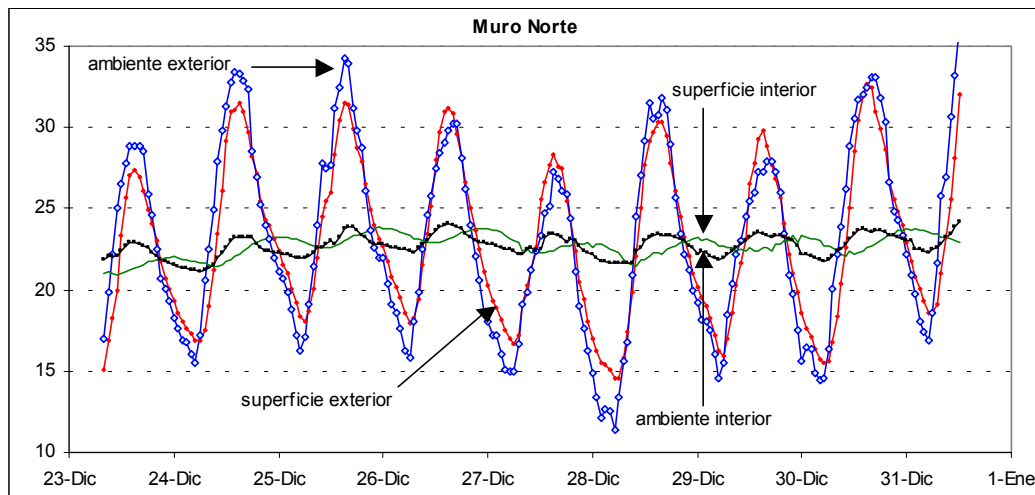


Figura 4: Temperatura ambiente exterior, temperatura superficial del interior y exterior del muro norte y temperatura ambiente interior (Dormitorio Central del Depto. 2) para el periodo de estudio.

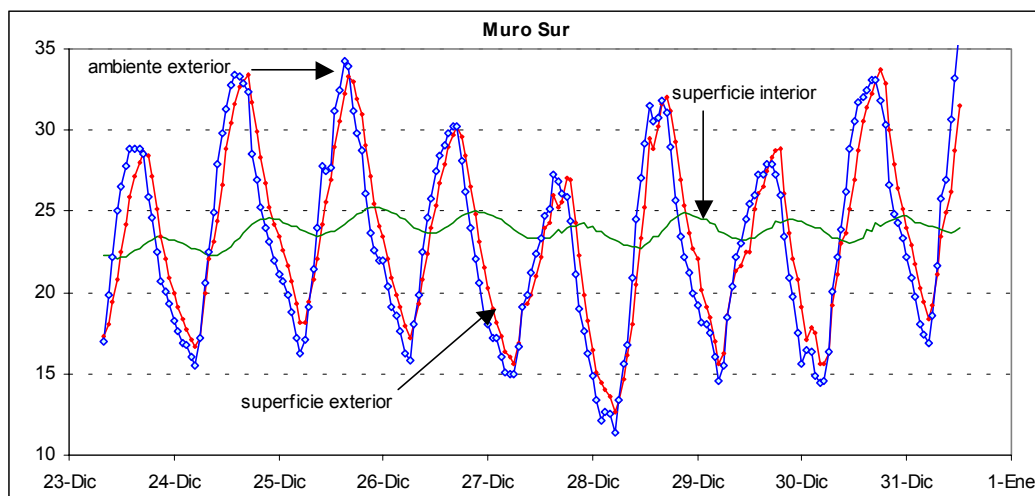


Figura 5: Temperatura ambiente exterior y temperaturas superficiales del interior y exterior del muro sur para el periodo de estudio.

La acumulación de energía en la masa de los muros se refleja en la disminución de la amplitud y en el desfasaje de la onda térmica (Figs. 4 y 5). Para el muro norte, la amplitud térmica disminuye de 13.5°C en la superficie exterior a 1°C en la interior, mientras que para el muro sur dicha amplitud disminuye de 16.1°C a 1.7°C. Debido a este efecto de acumulación, durante la noche la temperatura superficial en el exterior de la pared es siempre más alta que la ambiente exterior: en la hora de mínima temperatura (a la salida del sol) la pared norte está 1.5°C más arriba y la sur 1.2°C más alta que la temperatura ambiente. La diferencia entre ambos muros se debe a que la pared sur recibe menor cantidad de radiación solar que la pared norte. Durante los días 26 y 27 de diciembre se produjo una disminución de la temperatura ambiente, lo cual evidenció el efecto de la energía acumulada durante los días previos: en la pared norte, en donde el efecto es más notorio, la temperatura se mantuvo durante todo el día por encima de la ambiente exterior.

El desfasaje entre la temperatura interior y la exterior es de aproximadamente 9 horas (Figura 4). Es interesante observar el efecto de este desfasaje: durante las horas nocturnas, cuando la temperatura del departamento alcanza sus valores mínimos, la temperatura superficial de la pared alcanza sus valores máximos, favoreciendo la transferencia de calor desde la pared hacia

el ambiente interior (Fig. 4). Este comportamiento es altamente beneficioso para edificios residenciales durante el invierno, en que el muro calienta el aire del dormitorio durante la noche. En un edificio no residencial, probablemente este desfase no sería aprovechado por los usuarios, puesto que estaría deshabilitado durante las horas nocturnas.

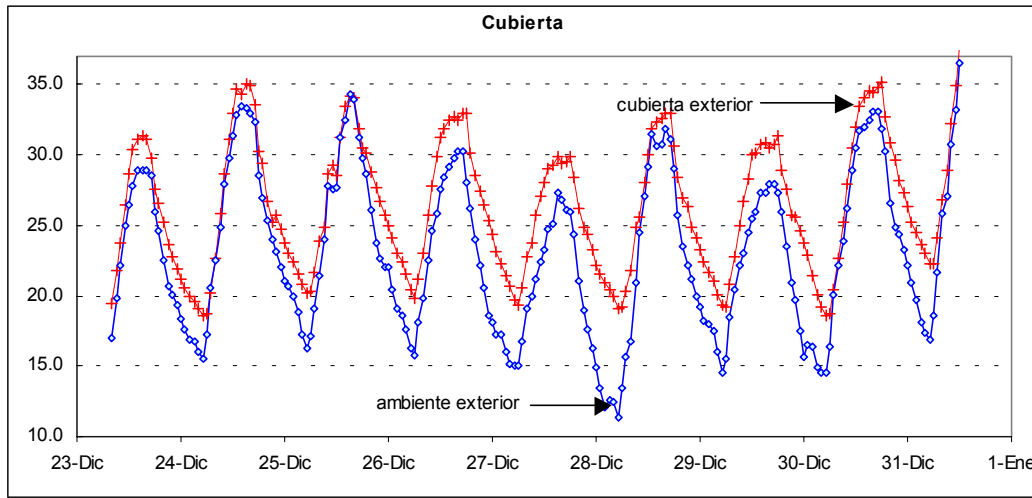


Figura 6: Temperatura ambiente exterior y temperatura superficial exterior de la cubierta para el periodo de estudio.

SIMULACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE PAREDES Y DE LA CUBIERTA

Para simular una pared que conecta los *locales* 1 y 2 de un edificio, cuya área es A_{paredj} y está constituida de capas de espesor e_i de diferentes materiales, *SIMEDIF para Windows* subdivide cada una de estas capas en subcapas de espesor Δx_i (para los nodos interiores) y $\Delta x_i/2$ (para los nodos superficiales), en donde $\Delta x_i = e_i / (\text{nro. de puntos de la capa } i + 1)$. El número de puntos de cada capa es ingresado por el usuario durante la entrada de datos. Como la pared puede tener varias capas (cada una con distinto número de puntos), entonces Δx puede variar entre la capa de un material y la capa subsiguiente de un material diferente. En la Fig. 7 se puede observar una PARED de un único material con las respectivas subcapas y sus temperaturas $T_{paredj,i}$, en donde j es el número de PARED e i es el número de subcapa. Ambas superficies de la PARED están en contacto con el aire de cada uno de los *locales* que conecta. La transferencia de calor entre la superficie y el aire del *local* se lleva a cabo por convección, a través de un coeficiente complejo de conducción-radiación h . Además, ambas superficies pueden (o no) recibir una cierta cantidad de energía radiante ($I_{paredj,1}$ e $I_{paredj,2}$, respectivamente) en una cierta área de radiación ($Arad_{paredj,1}$ y $Arad_{paredj,2}$), de la cual será absorbida por las superficies una cierta cantidad, de acuerdo a los coeficientes de absorción ($\alpha_{paredj,1}$ y $\alpha_{paredj,2}$).

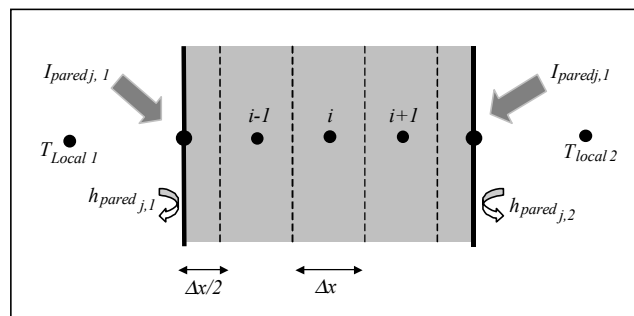


Figura 7: Discretización del elemento PARED en el SIMEDIF.

El balance energético para un nodo interno i de una pared queda expresado como:

$$(\rho c_p)_{paredj,i} \frac{\partial T_{paredj,i}}{\partial t} = k_{paredj,i} \frac{\partial^2 T_{paredj,i}}{\partial x^2} \quad (1)$$

mientras que para un nodo superficial, la expresión para el balance es la siguiente:

$$(\rho c_p)_{paredj,1} A_{paredj} \frac{\Delta x_i}{2} \frac{\partial T_{paredj,1}}{\partial t} = (I \alpha Arad)_{paredj,1} - h_{paredj,1} A_{paredj} (T_{paredj,1} - T_{local1}) + \left(k_{paredj,1} A_{paredj} \frac{\partial T_{paredj,1}}{\partial x} \right) \quad (2)$$

En esta última expresión se puede observar que la radiación que incide sobre la PARED j es repartida en toda su superficie. SIMEDIF luego utiliza el método de diferencias finitas explícito para expresar la derivada temporal y las derivadas espaciales y calcula la temperatura del nodo en el tiempo posterior $t + \Delta t$ a partir de la temperatura de los nodos vecinos en el tiempo presente t . Una descripción más detallada del modelo se encuentra en los trabajos de Flores Larsen y Lesino (2001a, 2001b).

La nueva versión de SIMEDIF para Windows permite al usuario acceder al archivo con las temperaturas superficiales de paredes que resultan de la simulación del edificio, con lo que es posible comparar los datos medidos con los que entrega el programa. Este procedimiento fue utilizado para simular las paredes y cubierta de estas residencias, pudiéndose comparar los datos medidos y simulados para las paredes norte y sur y para la cubierta. Las simulaciones de las temperaturas de los locales y la modelización del edificio completo pueden consultarse en los trabajos previos de Filippin et al. (2002a; 2002b). En SIMEDIF se caracterizaron las paredes norte, sur y la cubierta mediante las capas de materiales descriptas anteriormente, obteniéndose de la bibliografía sus propiedades térmicas. Para cada superficie exterior se utilizó un coeficiente convectivo-radiativo medio, el cual se aplica al periodo completo. Dicho coeficiente se obtuvo para cada caso considerando la velocidad media de viento en el periodo y utilizando la expresión dimensional para superficies planas expuestas a viento (Duffie y Beckman, 1991):

$$h = 5.7 + 3.8v \quad (5)$$

en donde v es la velocidad de viento en m/s and h es el coeficiente de transferencia en $W/m^2\text{°C}$. En el caso de superficies exteriores, se utilizaron coeficientes de $16 W/m^2\text{°C}$. En superficies interiores se utilizaron $6W/m^2\text{°C}$ para muros y $4W/m^2\text{°C}$ para el techo. Se utilizó un coeficiente de transferencia menor para el techo, debido a que el aire caliente en contacto con el mismo disminuye la transferencia de calor entre el aire del local y la superficie horizontal del cielorraso, siendo dicha transferencia menor que en el caso de superficies verticales.

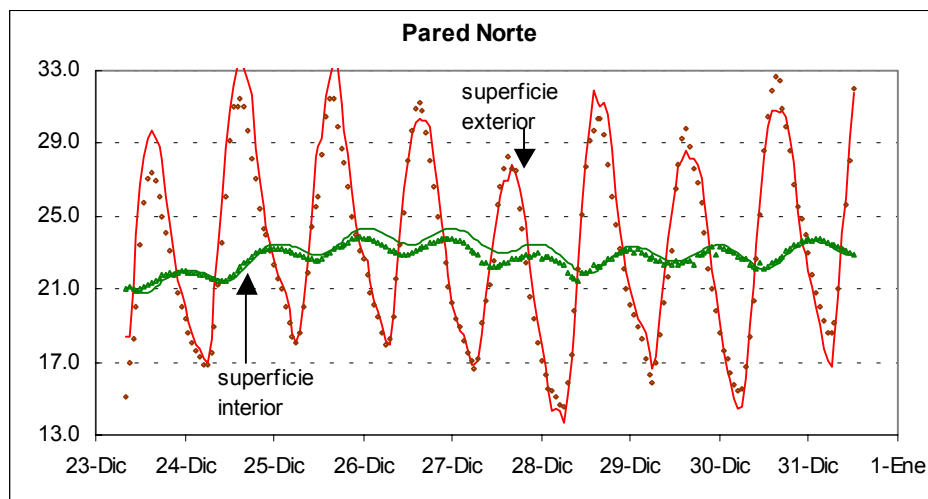


Figura 8: Temperaturas superficiales simuladas y medidas para los lados interno y externo de la pared norte. La simulación se indica con línea sólida.

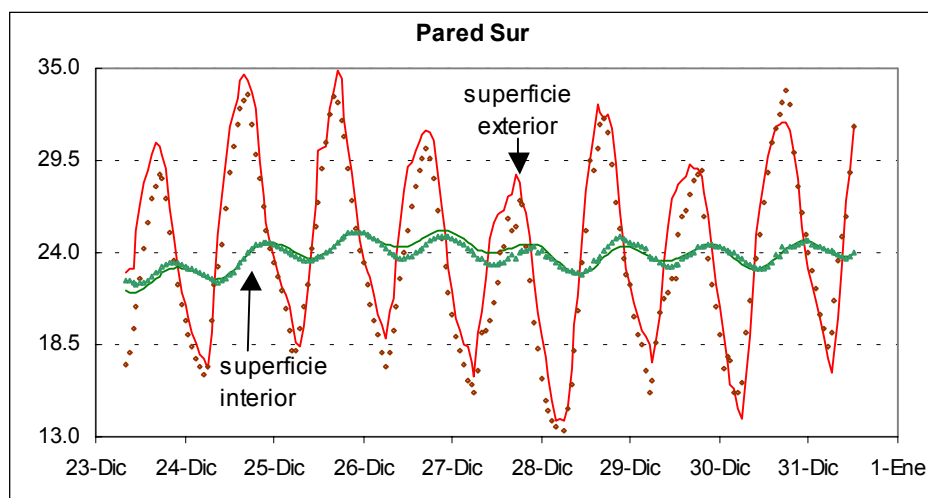


Figura 9: Temperaturas superficiales simuladas y medidas para los lados interno y externo de la pared sur. La simulación se indica con línea sólida.

Los resultados de la simulación se muestran en las Figs. 8 a 10. Como se puede observar, se encuentra un buen ajuste entre los datos medidos y los resultados de la simulación, inclusive considerando que se utilizó un coeficiente complejo medio para todo el periodo. Por eso aparecen ligeros desfases en las superficies exteriores de los muros durante los días 26, 27 y 28 de diciembre, en que probablemente aumentó la velocidad media de viento, mejorando la transferencia y disminuyendo la temperatura superficial de los muros. En SIMEDIF se utilizan valores medios de velocidad de viento para todo el periodo. Situaciones más comprometidas en que dichos coeficientes son altamente variables en el tiempo requieren del ingreso de valores diarios de dichos coeficientes, lo cual implica mayor complejidad en el ingreso de datos que, en la mayoría de los casos analizados y en el nivel de ajuste requerido, no se traduce en una mejora demasiado significativa del ajuste.

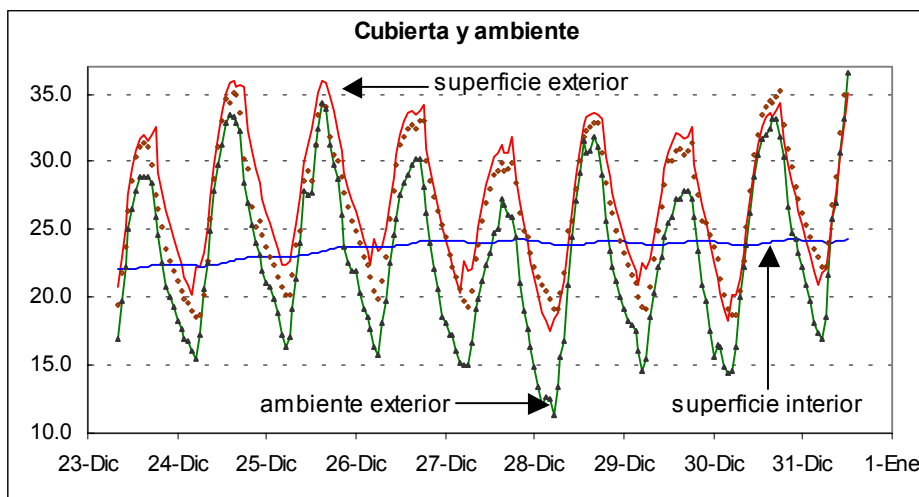


Figura 10: Temperatura ambiente exterior y temperatura superficial simulada y medida del lado externo de la cubierta y temperatura superficial interior simulada. La simulación se indica con línea sólida.

CONCLUSIONES

El monitoreo y la simulación realizados permitieron un análisis detallado del comportamiento térmico de los muros norte y sur y de la cubierta del edificio. Los resultados mostraron un buen ajuste entre datos medidos y simulados para un período en el que los departamentos estuvieron desocupados y cerrados. La simulación predijo correctamente la amplitud térmica y el desfase en la superficie interior de los muros, que resulta ser beneficioso para edificios residenciales en periodos invernales, en que es necesario que el calor acumulado en las paredes sea entregado a las habitaciones durante las horas nocturnas. Este ajuste permite ratificar con muy buena aproximación la validez de los coeficientes convectivos y de las características termofísicas de los materiales empleados. Las mediciones realizadas son de extrema utilidad para el cálculo de la temperatura media radiante y de la asimetría de temperatura radiante, parámetros fundamentales a la hora de evaluar el confort térmico de un edificio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, Peng (2004). The implications of thermal comfort in New Zealand house design. http://meanradianttemperature.com/chen_toc.htm
- Duffie A. y Beckman W. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Inc.
- Filippín C., Beascochea A. y Gorozurreta J. (2001). Residencias universitarias bioclimáticas en La Pampa. Resultados de su comportamiento térmico y energético. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, N° 5, pp.05.01-05.06.
- Filippín C., Beascochea A., Flores Larsen S. y Lesino G. (2002a). Monitoreo y simulación del comportamiento térmico de un conjunto de viviendas bioclimáticas para estudiantes de escasos recursos de la Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. En: Actas del XI Congreso Ibérico E Vi Ibero-Americano De Energía Solar, setiembre de 2002, Vilamoura, Portugal.
- Filippín, C., Beascochea, A., Flores Larsen, S. y Lesino, G. (2002b). Diseño y tecnología de un conjunto de viviendas bioclimáticas de la Universidad Nacional de La Pampa. Monitoreo térmico y energético. Energías Renovables y Medio Ambiente, N° 11, pp.1-10.
- Filippín C., Flores Larsen S. y Lesino G. (2002c). Simulación térmica de verano de un sector del bloque de residencias estudiantiles bioclimáticas en Santa Rosa, La Pampa. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 6, pp. 05.19-05.24.
- Flores Larsen, S. y Lesino, G. (2001a). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. Energías Renovables y Medio Ambiente, N° 9, pp.15-24.
- Flores Larsen, S. y Lesino, G. (2001b). A new code for the hour-by-hour thermal behavior simulation of buildings. Lesino. Seventh International IBPSA Conference On Building Simulation, agosto de 2001, Río de Janeiro, Brasil, pp. 75-82.
- Flores Larsen, S. y Lesino, G. (2002). Programa de diseño y simulación de edificios. En: Actas del XI Congreso Ibérico E Vi Ibero-Americano De Energía Solar, setiembre de 2002, Vilamoura, Portugal.
- MRT (2004). <http://www.squl.com/index.php?http://www.squl.com/comfort/radiant-temp.html>