



MEDICION Y SIMULACIÓN MEDIANTE P.S.T.A.R. DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL DE LA CIUDAD DE SALTA, ARGENTINA

Alejandro Hernández y Graciela Lesino

UNSa, Universidad Nacional de Salta,
CIUNSa, Consejo de Investigación de la UNSa.
INENCO, Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional.
Avda. Bolivia N° 5.150, Salta, C.P. 4.400, Argentina.
Tel. 54-387-4255424, Fax. 54-387-4255489
e-mail: alejo@unsa.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del monitoreo y posterior simulación con PSTAR del comportamiento térmico de un edificio residencial ubicado en la ciudad de Salta, noroeste de Argentina. El método PSTAR fue desarrollado para el análisis térmico de edificios livianos. La importancia de este estudio radica en el análisis de la aplicabilidad del PSTAR a los edificios masivos típicos de Argentina. Las mediciones fueron realizadas siguiendo un protocolo de monitoreo tendiente a optimizar la información recabada durante un corto período de tiempo (7 días). La simulación térmica arrojó un error de ajuste del orden de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para la mayoría de los locales monitoreados, considerándose que los resultados obtenidos al aplicar PSTAR a un edificio masivo son satisfactorios.

ABSTRACT

In this work, the results of the measurement and posterior simulation with PSTAR of the thermal behavior of a residential building located in the city of Salta, northwest of Argentina are presented. The method PSTAR was developed for the thermal analysis of light buildings. The importance of this study resides in the analysis of the applicability from the PSTAR to the typical massive buildings of Argentina. The measurements were carried out following a monitoring protocol tending to optimize the information obtained during a short period of time (7 days). The thermal simulation threw an adjustment error of $\pm 1^{\circ}\text{C}$ for the most of the building zones evaluated, being considered satisfactory the results obtained when applying PSTAR to a massive building.

1. INTRODUCCIÓN

El PSTAR (Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization) es un método de simulación horaria del comportamiento térmico de un edificio que permite extraer sus parámetros característicos globales a partir de monitoreos de corto plazo midiendo un pequeño número de variables tales como temperatura interior, exterior, radiación solar y ganancias internas (Subbarao, 1988). Los datos recogidos pueden emplearse en el análisis de performance térmica del edificio a largo plazo, diagnóstico y control de calefacción, ventilación y sistemas de acondicionamiento de aire como así también realizar comparaciones entre el diseño y la performance real.

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

Para un edificio de un solo local, bajo ciertas hipótesis, se puede escribir la siguiente ecuación de balance energético al tiempo t:

$$Q_{int}(t) = U [T_{int}(t) - T_{ext}(t)] + Q_{acum}^{in}(t) + Q_{acum}^{ext}(t) - Q_{sol}(t) + Q_{vent}(t) + Q_{aux}(t) + Q_{suelo}(t) + Q_{cielo}(t) \quad [Eq.01]$$

donde:

Q_{int} = ganancias internas de calor por artefactos, luces, habitantes, etc.

U = coeficiente global de pérdida en estado estacionario.

Q_{acum}^{in} = calor neto que cargan (o, si es negativo, descargan) las masas debido únicamente a la variación de la temperatura interior T_{int} .

Q_{acum}^{ext} = calor neto que cargan (o, si es negativo, descargan) las masas debido únicamente a la variación de la temperatura exterior T_{ext} .

Q_{sol} = ganancia neta de calor por el aire interior debida al sol.

Q_{vent} = pérdidas de calor causadas por infiltraciones y ventilación.

Q_{aux} = calor entregado por los sistemas de calefacción.

Q_{suelo} = flujo de calor al suelo.

Q_{cielo} = pérdidas radiativas de calor debidas a la disminución de la temperatura de cielo.

La hipótesis principal en esta descomposición es que las propiedades de transferencia de calor son independientes de la temperatura, o sea que las funciones de transferencia son tratadas en forma linealizada.

Cada uno de los términos en la ecuación de balance puede ser clasificado como *primario* o *secundario* de acuerdo a su magnitud. En el problema inverso (validación de datos medidos), PSTAR da un tratamiento especial a los términos primarios mediante su renormalización de tal manera que la ecuación de balance renormalizada sea satisfecha en el sentido de los cuadrados mínimos.

En síntesis, el método PSTAR para el problema hacia adelante (diseño del edificio) consta de los siguientes pasos:

1. Cálculo de las admitancias térmicas de todo el edificio.
2. Conversión de éstas a coeficientes de función de transferencia mediante la aplicación de la transformada z, análoga a la de Laplace en el caso discreto.
3. Cálculo de ganancias solares.
4. Selección de modelos de flujo de aire (infiltraciones y flujos interzonas).
5. Cálculo de pequeños flujos de calor mediante teoría de perturbaciones.
6. Simulación a través de series temporales.

Para el problema inverso hay un paso adicional que involucra, como ya se dijo, la renormalización de las funciones de transferencia (para ajustar los datos de performance medidos) que serán usadas en las subsecuentes simulaciones.

Dado que, en general, en sólo unos pocos días de monitoreo no se producen todos los tipos de condiciones climáticas a las que un edificio puede estar sometido durante su vida útil, es necesario recabar en este breve período el máximo posible de información sobre su comportamiento sometiéndolo a ensayos de calentamiento y/o enfriamiento auxiliar debidamente planificados. Esto constituye lo que se denomina un *protocolo de monitoreo*.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO ESTUDIADO

El edificio, que data del año 1953, está ubicado en la ciudad de Salta (24° 45' latitud sur y 65° 30' longitud oeste), Noroeste de Argentina, a 1.180 m.s.n.m.

El clima de la región es de tipo templado cálido "a" según norma IRAM N° 11.603 (Lesino, Giménez y Castro Padula, 1983), con inviernos soleados y rigurosos (fuertes heladas) y veranos cálidos y lluviosos, correspondiente a la provincia fitogeográfica del chaco serrano. Los vientos provienen predominantemente de la dirección NE con valor medio mensual de 3 km/h en marzo y 7 km/h en octubre como valores extremos. Los valores máximos medios mensuales para estos meses son 24 km/h y 35 km/h respectivamente.

La estructura del edificio está construida con mampostería de ladrillo cocido y revoque de mortero, encadenado antisísmico de 0,2 m de altura y ancho de acuerdo al muro, techo de placas acanaladas de fibrocemento a dos aguas que descargan hacia la medianera central (paralela al muro norte) y contrapiso de 0,1 m de espesor cubierto con baldosas de cemento. No existe aislación térmica ni cielorraso. El azimut del muro norte es de 172° (8° E) aproximadamente.

El edificio consta de seis locales interiores y un lavadero techado, según se observa en la figura 1 que corresponde a una escala 1:100. Los muros exteriores son de 0,3 m de espesor (salvo la medianera entre el lavadero y el dormitorio que es de 0,16 m) y los interiores de 0,16 m de espesor.

Los cerramientos constan de una puerta (salvo la cocina y la comunicación entre el comedor y el pasillo que tienen sólo el marco) por local y una ventana en carpintería de madera de dos hojas con vidrios simples en la cocina y el baño y tres hojas en los dormitorios y el comedor.

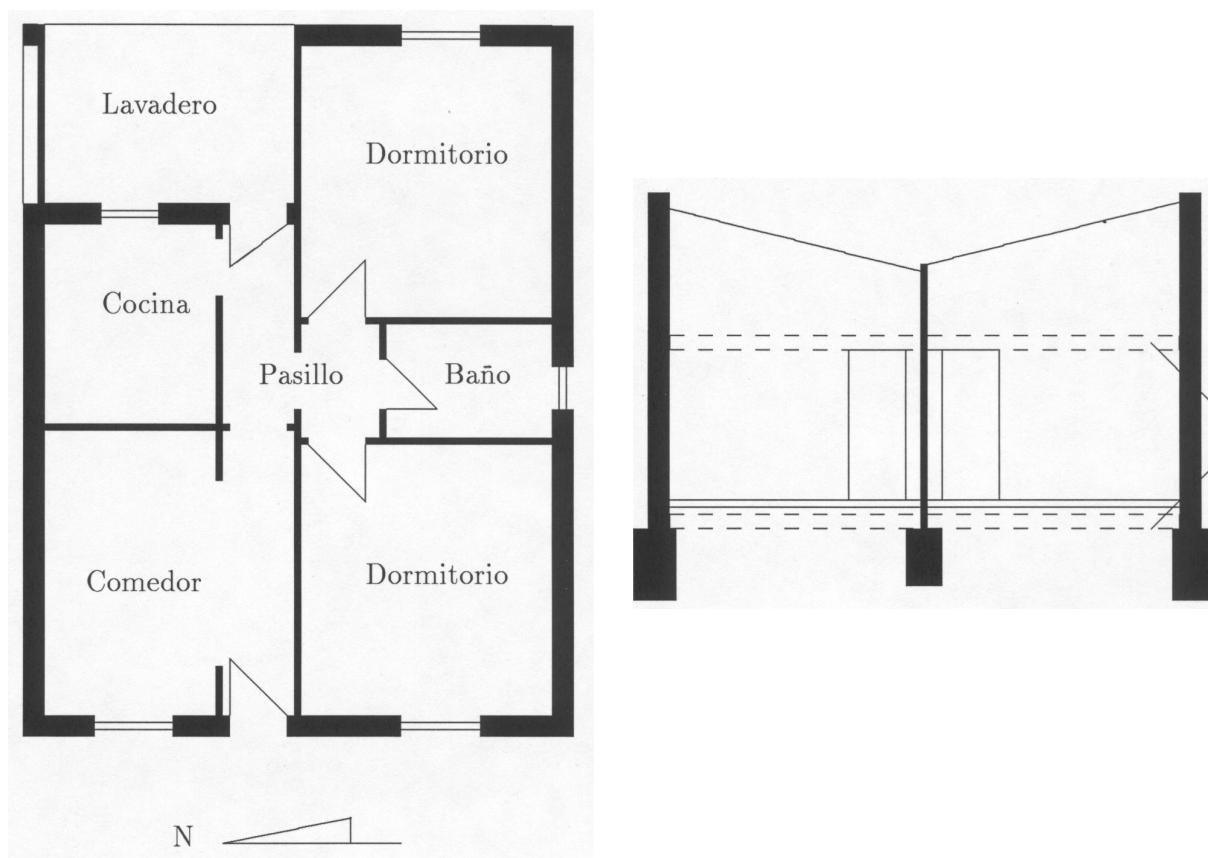


Figura 1: Vista en planta y en corte del edificio.

3. PROTOCOLO DE MONITOREO

El método PSTAR fue desarrollado para el análisis térmico de edificios livianos, de acuerdo a la edificación típica de Estados Unidos. La importancia del estudio realizado en este trabajo radica entonces en el análisis de la aplicabilidad del PSTAR a los edificios masivos típicos de Argentina. Es así que resulta indispensable diseñar un protocolo de monitoreo adecuado a las grandes constantes de tiempo asociadas a los edificios pesados.

Se planificó entonces monitorear una noche de iniciación, un día con datos de radiación solar, una noche de calefacción simultánea de dos locales con dos estufas de 1.200 W por local, otro día con datos de radiación, una noche de enfriamiento por disminución de la temperatura ambiente, nuevos datos diurnos, una noche de calefacción de otros dos locales y finalmente un último día con datos diurnos. Los locales seleccionados para el calentamiento fueron el comedor y la cocina sobre el ala norte y los dos dormitorios sobre el ala sur. Al aplicar este protocolo la carga eléctrica durante el calentamiento resultó tan grande que se quemaron los fusibles a media noche. A partir de entonces se calefaccionó un local por vez con dos estufas de 1.200 W los dormitorios y con una los restantes, aumentándose entonces el período de monitoreo en dos noches y dos días. El orden del calefaccionado fue el siguiente:

- 1) Cocina
- 2) Dormitorio Oeste
- 3) Dormitorio Este
- 4) Comedor.

Se eligió este orden a fin de obtener buenos saltos térmicos entre locales próximos.

4. MEDICIONES REALIZADAS EN EL EDIFICIO

La colocación de los sensores se llevó a cabo a fines del mes de Abril efectuándose el monitoreo entre el 5 y el 23 de Mayo, seleccionándose para la evaluación térmica el período del 13 al 18 de Mayo dada la regularidad en el funcionamiento de todos los aparatos y la puesta a punto del protocolo. Los días estuvieron, en general, soleados con algo de bruma durante las primeras horas de la mañana

El equipo de monitoreo constó de una PC XT transformada en datalogger mediante la incorporación de una tarjeta de adquisición de datos PCLAB 812 con 16 canales análogos. Las variables monitoreadas, con sus respectivas incertezas de medida, fueron:

- Temperatura de bulbo seco de los 6 locales y del exterior ($\pm 0,5$ °C).
- Irradiancia solar global sobre superficies horizontal y vertical al norte (± 4 %).
- Velocidad del viento ($\pm 0,1$ m/s).
- Humedad relativa (± 2 %).
- Energía entregada por dos estufas de 1.200 W cada una (± 2 %).

Las primeras mediciones revelaron la presencia de grandes infiltraciones de aire originadas en el asiento desparejo de las chapas de fibrocemento del techo y de la falta de ajuste de los cerramientos. Estas infiltraciones, sumadas a la escasa masa de la cubierta, lograron opacar el efecto de la masa de muros y pisos en la acumulación del calor ya que, al apagar las estufas, la temperatura de los locales calefaccionados disminuía rápidamente.

El monitoreo se llevó a cabo con las puertas de los dormitorios y el baño cerradas a fin de disminuir los flujos máxicos desde estos locales. Ahora bien, las aberturas de comunicación entre el comedor, el pasillo y la cocina no disponen de cerramientos por lo que al calefaccionar esta última, la diferencia de densidades del aire generó un loop convectivo que elevó la temperatura de los otros dos ambientes. Lo mismo ocurrió, pero en sentido inverso, al calefaccionar el comedor.

5. CÁLCULO DE ADMITANCIAS TÉRMICAS Y DEMÁS FLUJOS

Los valores de las propiedades térmicas de los materiales fueron obtenidos a partir de tablas (Incropera y DeWitt, 1990).

Las ganancias solares directas por las ventanas del comedor y los dormitorios fueron asumidas como ganancias internas de calor por el aire interior sin considerar su acumulación en pisos y muros debido a que el área vidreada por local es pequeña. El valor de transmitancia promedio de los vidrios, τ , se fijó en 0,85 (Duffie & Beckman, 1980) para un valor de $KL = 0,037$ (correspondiente a un vidrio de calidad regular y espesor $L = 2,3$ mm) y un ángulo de incidencia promedio de 50° dada la orientación de estas ventanas.

Debido a que el método empleado para el cálculo de los flujos al suelo fue desarrollado para edificios unizonales (Mitalas, 1983) (Krarti, Claridge y Kreider, 1985), produciéndose las pérdidas más importantes a lo largo del perímetro, se estimaron estos flujos a partir del correspondiente a un edificio

de una sola zona con el perímetro y el área del monitoreado, ponderando las pérdidas de cada local con su perímetro externo y las acumulaciones con su área.

Las pérdidas de calor por infiltración se calcularon mediante la ecuación:

$$Q_{inf} = (\rho c_p)_{aire} V I (T_{int} - T_{ext}) \quad [Eq.02]$$

donde:

$$I = (C/V) (0,026 |\Delta T| + 0,010 v^2)^n \quad [Eq.03]$$

es la tasa de renovaciones de aire por hora del método de J. Kronvall (1980); C y n son dos parámetros obtenidos experimentalmente, V el volumen de la habitación, ΔT el salto térmico medio horario entre adentro y afuera en °C y v , la velocidad del viento media horaria en m/s. Para la evaluación del número de renovaciones de aire por hora, I , se empleó entonces la [Eq.03] con $|\Delta T|$ y v promediados en todo el período de monitoreo dado que el método PSTAR exige la linealidad de los coeficientes de transferencia.

Para el cálculo de las pérdidas por radiación hacia la temperatura de cielo fue necesario determinar la emisividad infrarroja de la atmósfera, la cual depende de la *temperatura de rocío* mediante la siguiente expresión, válida para la localidad de Salta (Frigerio et al, 1991):

$$\varepsilon = 0,767 + 0,55 (tr / 100) - 0,26 (tr / 100)^2 \quad [Eq.04]$$

donde tr es la temperatura de rocío en °C determinada mediante mediciones tridiurnas de temperaturas de bulbo seco y húmedo realizadas con un psicrómetro manual.

El intercambio radiativo entre la chapa del techo y el cuerpo negro “cielo” está dado por:

$$Q_{cielo}^i = 5,67 \cdot 10^{-8} A_i \varepsilon_p (T_c^4 - \varepsilon T_a^4) \quad (\text{en Watts}) \quad [Eq.05]$$

siendo A_i el área del techo del iésimo local, ε_p su emitancia infrarroja, T_c su temperatura y T_a la ambiente, ambas en °K. Este flujo debe linealizarse definiendo un coeficiente radiativo h_r^i , promedio.

6. ECUACIONES DE BALANCE DE ENERGÍA

Dado que el edificio consta de seis locales, en cada paso de tiempo n debieron resolverse simultáneamente seis ecuaciones de balance energético. Las ganancias internas del comedor y de los dormitorios provienen de la radiación solar que entra por sus ventanas mientras que la del pasillo corresponde a la energía disipada por el equipo de monitoreo ($\approx 0,07$ MJ/h).

Ecuación 1: Pasillo

$$\begin{aligned} Q_{1}^{int}(n) = & L_1 T_1(n) - L_{1,a} T_a(n) - L_{1,2} T_2(n) - L_{1,3} T_3(n) - L_{1,4} T_4(n) - L_{1,5} T_5(n) - L_{1,6} T_6(n) - L_{1,L} T_L(n) \\ & - S_{1T} I_{1T}(n) + Q_{1,1}^{acum}(n) + Q_{1,2}^{acum}(n) + Q_{1,3}^{acum}(n) + Q_{1,4}^{acum}(n) + Q_{1,5}^{acum}(n) + Q_{1,6}^{acum}(n) \\ & + Q_{1,L}^{acum}(n) + Q_{1}^{vent}(n) - Q_{1}^{aux}(n) + Q_{1}^{suelo}(n) + Q_{1}^{cielo}(n) \end{aligned} \quad [Eq.06]$$

Ecuación 2: Comedor

$$\begin{aligned} Q_{2}^{int}(n) = & L_2 T_2(n) - L_{2,a} T_a(n) - L_{2,1} T_1(n) - L_{2,3} T_3(n) - L_{2,4} T_4(n) - S_{2N} I_N(n) - S_{2O} I_O(n) - S_{2T} I_{2T}(n) \\ & + Q_{2,2}^{acum}(n) + Q_{2,a}^{acum}(n) + Q_{2,1}^{acum}(n) + Q_{2,3}^{acum}(n) + Q_{2,4}^{acum}(n) + Q_{2N}^{acum}(n) + Q_{2O}^{acum}(n) \\ & + Q_{2}^{vent}(n) - Q_{2}^{aux}(n) + Q_{2}^{suelo}(n) + Q_{2}^{cielo}(n) \end{aligned} \quad [Eq.07]$$

Ecuación 3: Cocina

$$\begin{aligned}
0 = & L_3 T_3(n) - L_{3,a} T_a(n) - L_{3,1} T_1(n) - L_{3,2} T_2(n) - L_{3,L} T_L(n) - S_{3N} I_N(n) - S_{3T} I_{3T}(n) + Q^{accum}_{3,3}(n) \\
& + Q^{accum}_{3,a}(n) + Q^{accum}_{3,1}(n) + Q^{accum}_{3,2}(n) + Q^{accum}_{3,L}(n) + Q^{accum}_{3N}(n) + Q^{vent}_{3}(n) - Q^{aux}_{3}(n) \\
& + Q^{suelo}_{3}(n) + Q^{cielo}_{3}(n)
\end{aligned} \quad [Eq.08]$$

Ecuación 4: Dormitorio Oeste

$$\begin{aligned}
Q^{int}_4(n) = & L_4 T_4(n) - L_{4,a} T_a(n) - L_{4,1} T_1(n) - L_{4,2} T_2(n) - L_{4,5} T_5(n) - S_{4O} I_O(n) - S_{4T} I_{4T}(n) + Q^{accum}_{4,4}(n) \\
& + Q^{accum}_{4,a}(n) + Q^{accum}_{4,1}(n) + Q^{accum}_{4,2}(n) + Q^{accum}_{4,5}(n) + Q^{accum}_{4O}(n) + Q^{vent}_4(n) - Q^{aux}_4(n) \\
& + Q^{suelo}_4(n) + Q^{cielo}_4(n)
\end{aligned} \quad [Eq.09]$$

Ecuación 5: Baño

$$\begin{aligned}
0 = & L_5 T_5(n) - L_{5,a} T_a(n) - L_{5,1} T_1(n) - L_{5,4} T_4(n) - L_{5,6} T_6(n) - S_{5T} I_{5T}(n) + Q^{accum}_{5,5}(n) + Q^{accum}_{5,a}(n) \\
& + Q^{accum}_{5,1}(n) + Q^{accum}_{5,4}(n) + Q^{accum}_{5,6}(n) + Q^{vent}_5(n) - Q^{aux}_5(n) + Q^{suelo}_5(n) + Q^{cielo}_5(n)
\end{aligned} \quad [Eq.10]$$

Ecuación 6: Dormitorio Este

$$\begin{aligned}
Q^{int}_6(n) = & L_6 T_6(n) - L_{6,a} T_a(n) - L_{6,1} T_1(n) - L_{6,5} T_5(n) - L_{6,L} T_L(n) - S_{6E} I_E(n) - S_{6T} I_{6T}(n) + Q^{accum}_{6,6}(n) \\
& + Q^{accum}_{6,a}(n) + Q^{accum}_{6,1}(n) + Q^{accum}_{6,5}(n) + Q^{accum}_{6,L}(n) + Q^{accum}_{6E}(n) + Q^{vent}_6(n) - Q^{aux}_6(n) \\
& + Q^{suelo}_6(n) + Q^{cielo}_6(n)
\end{aligned} \quad [Eq.11]$$

La nomenclatura empleada es la siguiente:

Q^{int}_i : ganancia de calor en el local (i) debida a los artefactos eléctricos.

L_i : coeficiente global de pérdida estacionaria correspondiente a la admitancia interior del local (i).

$L_{i,a}$: coeficiente global de pérdida estacionaria entre el local (i) y el exterior.

$L_{i,j}$: coeficiente global de pérdida estacionaria entre los locales (i) y (j).

$Q^{accum}_{i,j}$: energía acumulada o cedida (si es negativa) por el muro que conecta los ambientes (i) y (j) como consecuencia de la variación de la temperatura del local (j).

$S_{iE, iN, iO}$: ganancia solar en estado estacionario por parte del local (i) desde la orientación Este, Norte u Oeste.

S_{iT} : ganancia solar en estado estacionario por parte del local (i) desde la cubierta de fibrocemento.

$Q^{accum}_{iE, iN, iO}$: energía acumulada o cedida (si es negativa) por los muros exteriores del local (i) como consecuencia de la variación de la radiación solar colectada desde la orientación Este, Norte u Oeste.

Q^{aux}_i : energía entregada por la estufa en el local (i).

Q^{vent}_i : pérdida de calor por infiltración desde el local (i).

Q^{cielo}_i : pérdida de calor por radiación al cielo desde el local (i).

Q^{suelo}_i : pérdida de calor al suelo desde el local (i).

T_i : temperatura del local (i).

T_a : temperatura exterior.

$I_{E,N,O,T}$: irradiación solar colectada en las direcciones E, N, O o por el techo.

El subíndice L corresponde al lavadero.

7. RENORMALIZACIÓN DE LOS FLUJOS PRIMARIOS

Como resultado del análisis y clasificación de los distintos flujos energéticos en *primarios* y *secundarios*, se determinaron cinco clases de coeficientes de renormalización (o coeficientes de ajuste) para el *i*-ésimo local según se detalla a continuación:

- | | | |
|--|--|---|
| p1: renormaliza al término $L_i T_i(n)$. | | p4: renormaliza al término $S_{i,T} I_{i,T}$. |
| p2: renormaliza al término $Q_{i,i}^{acum}$. | | p5: renormaliza al término $Q_{vent,i}$. |
| p3: renormaliza al término $Q_{acum.suelo_i}$. | | |

Si los valores de propiedades térmicas supuestos en la auditoría son correctos, los coeficientes de renormalización deben ser iguales a la unidad. Procediendo con la renormalización sobre todo el período de monitoreo, se obtuvieron los valores de la Tabla 1.

Tabla 1: Coeficientes de renormalización de cada local

Local	p1	p2	p3	p4	p5
Cocina	0,73	0,65	0,65	0,06	-----
Comedor	0,54	1,5	1,5	0,4	-----
Dorm. Oeste	0,741	1,16	1,16	0,585	-----
Dorm. Este	0,748	0,83	0,83	0,225	-----
Baño	0,816	-----	-----	0,2	5
Pasillo	0,68	1,6	-----	0,21	6

Según se aprecia en la tabla, durante la etapa de auditoría se sobreestimaron los flujos $L_i T_i$ de todos los locales. En este sentido, la mayor discrepancia corresponde al comedor para el cual dicha sobreestimación fue del 46 %, mientras que el mayor acuerdo se logró en el baño donde el error fue de aproximadamente 18 %. En el caso de las acumulaciones el ajuste revela una sobreestimación en los valores de auditoría del comedor y el dormitorio Oeste y una subestimación en los locales restantes, correspondiendo el mayor desacuerdo al pasillo (subestimación del 60 %). Durante la auditoría resultaron sobreestimados también los flujos debidos a la radiación solar por techos de los 6 locales. El caso más desfavorable corresponde a la cocina con una sobreestimación del 94%, mientras que el mejor acuerdo se obtuvo en el dormitorio Oeste con un déficit del orden del 42 %. Finalmente, los coeficientes de renormalización de flujos por ventilación correspondientes al baño y al pasillo denotan una importante subestimación de las infiltraciones correspondientes. Los coeficientes de renormalización obtenidos contemplan los errores cometidos en la estimación de los flujos por radiación al cielo, de ciertas infiltraciones y de las ganancias solares por ventanas.

8. SIMULACIÓN CON LAS ECUACIONES DE BALANCE RENORMALIZADAS

Una vez obtenidos los parámetros de renormalización se procedió a simular los datos medidos mediante el uso de las ecuaciones de balance renormalizadas. A continuación se presentan los gráficos comparativos entre medición y simulación correspondientes a los cuatro locales de mayor interés: Cocina, Comedor y ambos Dormitorios.

En la figura 2 se comparan las curvas correspondientes a los valores simulados y medidos en la Cocina. Puede observarse que el ajuste tiene un error promedio (por exceso o por defecto) de 2 °C, representando éste el mayor desacuerdo entre los seis locales evaluados. Sin embargo, el valor medio en todo el período ensayado coincide en ambas curvas (18,4 °C), como así también los saltos térmicos diarios simulados y medidos, no observándose un desfase significativo entre los máximos y mínimos de ambas representaciones.

Esto convalida el valor de 0,65 obtenido en la renormalización de las masas de este local (p2 y p3). Obsérvese la buena coincidencia evidenciada la cabo del tercer día del período bajo estudio donde el ajuste es inferior a 1 °C.

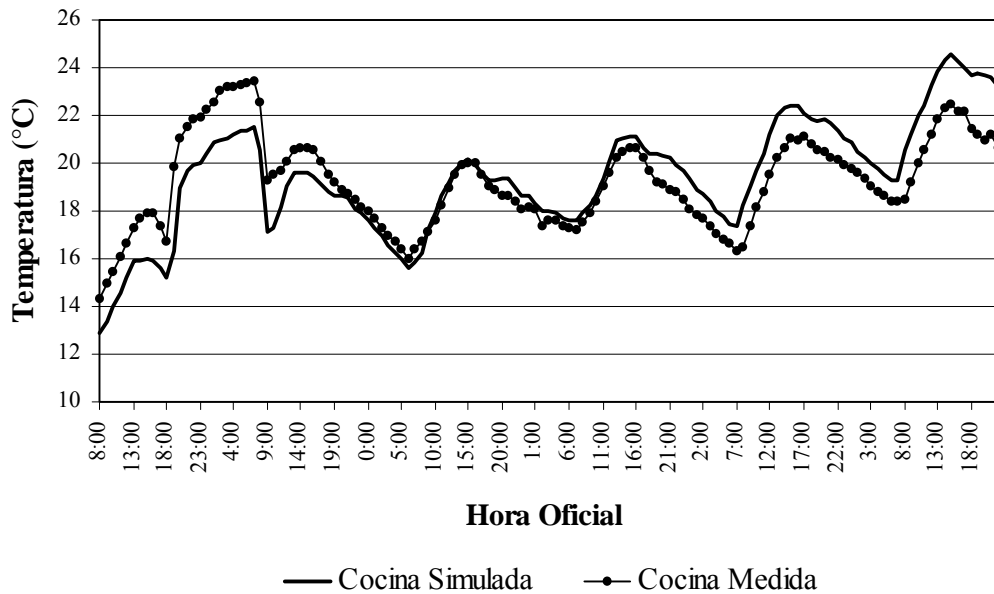


Figura 2: Valores medidos y simulados para la Cocina.

En la figura 3 se analizan las curvas correspondientes a la simulación del Comedor. En este caso el error de ajuste promedio es del orden de 1 °C, coincidiendo muy bien las temperaturas medias y el momento en que se producen los máximos y mínimos en ambas curvas. Nuevamente el mejor ajuste se observa durante el tercer día del período estudiado. Este local es el único donde no se obtuvo un salto térmico importante durante el calentamiento auxiliar debido, posiblemente, a la existencia de grandes infiltraciones y a que esta habitación es la de mayor volumen en toda la casa. El hecho de calefaccionar el Comedor con una sola estufa respondió a una estrategia tendiente a determinar la cantidad de energía auxiliar óptima para cada volumen estudiado. Así, se determinó que para un volumen como el de la Cocina es suficiente con una sola estufa de 1.200 W mientras que para locales más grandes (Dormitorios y Comedor) se requieren dos estufas encendidas a la vez.

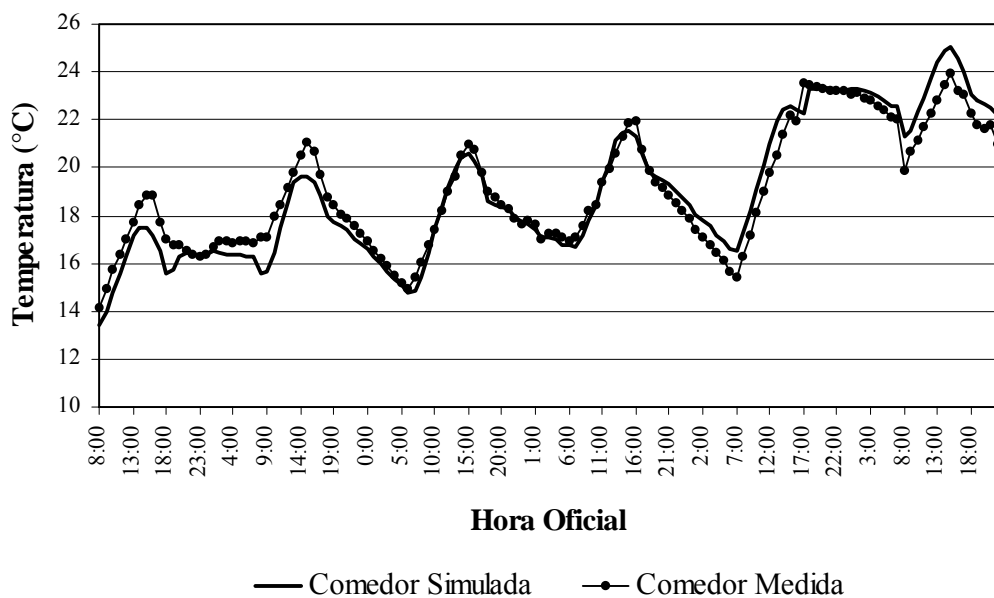


Figura 3: Valores medidos y simulados para el Comedor.

En la figura 4 se presentan los resultados de la simulación correspondientes al dormitorio que da al Oeste. Con un error promedio de 1 °C, este local es el que presenta el mejor acuerdo entre valores medidos y simulados, tanto en valor medio como en amplitud de oscilación y falta de desfase

temporal. Puede apreciarse en la gráfica el excelente acuerdo logrado durante el tercer y cuarto día simulados como así también durante el período de calefacción correspondiente.

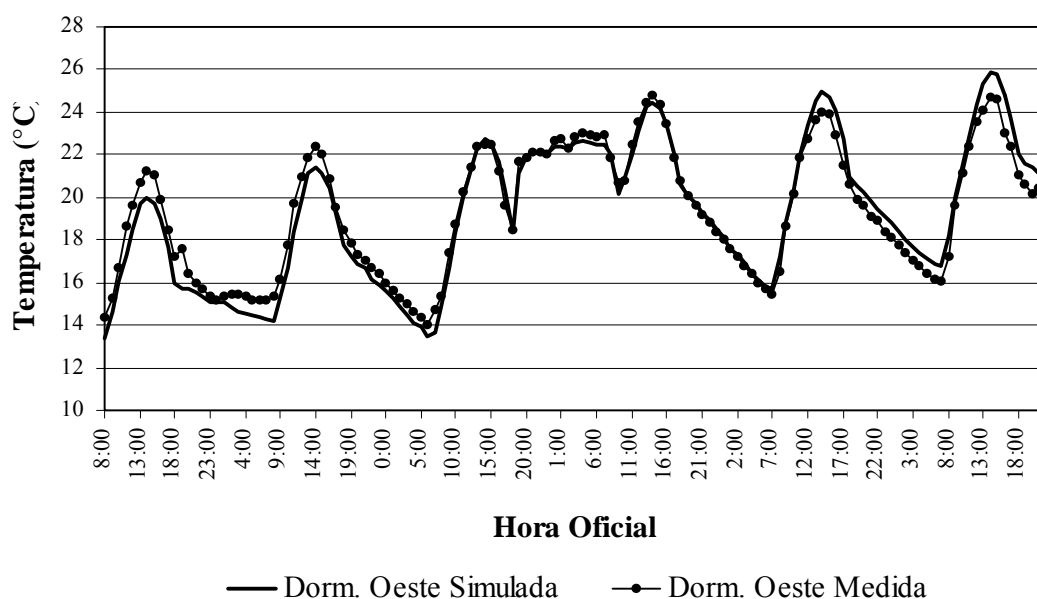


Figura 4: Valores medidos y simulados para el Dormitorio Oeste.

En la figura 5 se comparan los resultados de la simulación con los valores medidos en el dormitorio que da al Este. Nuevamente el error promedio es del orden de 1 °C pero en general el ajuste no es tan exacto como en el otro dormitorio. Sin embargo no se observa desfasaje temporal entre los máximos y mínimos de ambas curvas, coincidiendo las amplitudes de los saltos térmicos diarios. Esto evidencia un buen ajuste en las masas de acumulación (p_2 y p_3 iguales a 0,83). Se observa además, en la curva simulada, un sobrecalentamiento del orden de 1 °C durante el período de calentamiento auxiliar del local.

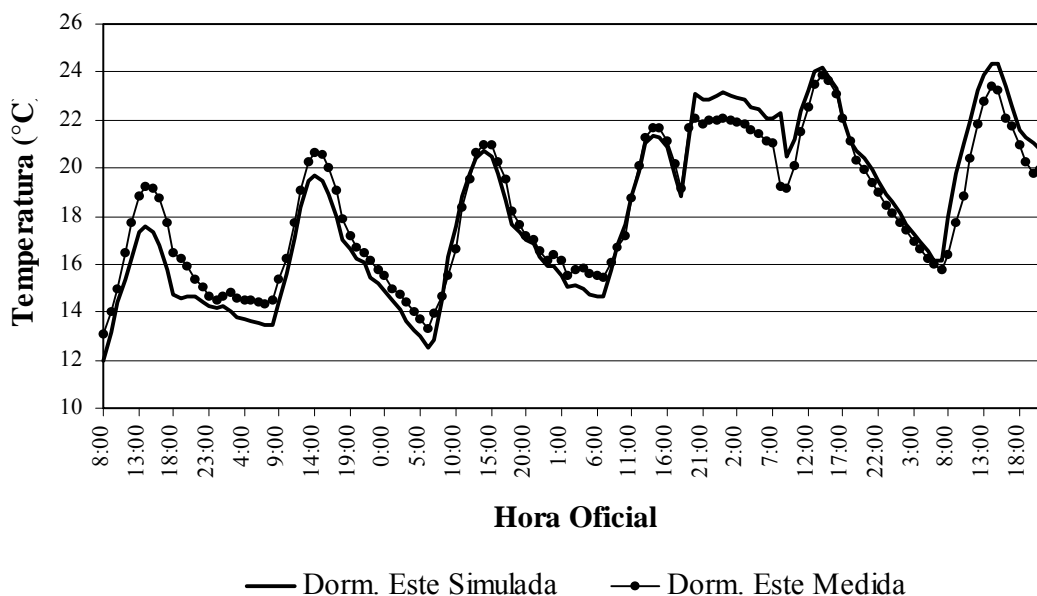


Figura 5: Valores medidos y simulados para el Dormitorio Este.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó el método PSTAR al estudio de la performance térmica de un edificio residencial pesado (masivo) típico de Argentina, contrastando valores medidos y simulados. Los

coeficientes globales de pérdida estimados desde la auditoría resultaron sobrevaluados ya que los coeficientes de renormalización obtenidos estuvieron comprendidos entre 0,54 y 0,82. En cuanto a la energía acumulada en las masas de muros y pisos los coeficientes de renormalización correspondientes variaron entre 0,65 y 1,6 ya que mediciones de pocos días no permiten reproducir adecuadamente el comportamiento de las masas de acumulación de las magnitudes presentes en las construcciones tradicionales del país. Por otra parte, los coeficientes de renormalización de la radiación absorbida por los techos indicaron una gran sobrevaluación en los valores de auditoría. Se detectaron, además, grandes infiltraciones con tasas de renovaciones de aire por hora del orden de 5, provenientes posiblemente de la poca estanqueidad manifestada por las chapas de fibrocemento de los techos.

De la simulación térmica con PSTAR se concluye que el error de ajuste para este edificio es del orden de $\pm 1^\circ\text{C}$, salvo en la cocina para la cual el error fue de $\pm 2^\circ\text{C}$. Dado que la incerteza en la medición es de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, los errores de ajuste pueden ser, en algunos casos, inferiores a estos valores. Sólo para el comedor y el pasillo la amplitud térmica diaria simulada resultó menor que la medida. Si bien el método fue desarrollado para edificios livianos, contempla matemáticamente la posibilidad de aplicarlo a edificios pesados ya que, según la [Eq. 01], divide cada admitancia térmica en un término que gobierna la pérdida en estado estacionario (el más importante en los edificios livianos) y en otros que contemplan la acumulación de energía en muros, pisos y techos con masa. Al aplicar la transformada z a las funciones de transferencia se pueden incluir los retardos temporales típicos de la inercia térmica de los elementos masivos. La exitosa renormalización de los flujos primarios, entre los cuales se encuentran los correspondientes a la acumulación de energía en estos elementos, condujo a los excelentes resultados logrados al aplicar el PSTAR a este edificio pesado.

Dado que el protocolo de monitoreo practicado contribuyó a determinar la cantidad de energía auxiliar óptima para el ensayo (de acuerdo al volumen de cada local), permitiendo además detectar la existencia de importantes infiltraciones y, en virtud de los buenos resultados obtenidos en la simulación, se concluye que el protocolo ensayado es aplicable a un edificio de características masiva como el del presente estudio. Es conveniente resaltar la corta duración del ensayo (prácticamente 1 día por local,) como así también el bajo número de sensores empleado. De todo lo expuesto se concluye que el método PSTAR es igualmente aplicable a un edificio liviano que a uno pesado tomando, en cada caso, las precauciones pertinentes en el sentido de una buena programación del protocolo de monitoreo.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1980) "Solar Engineering of Thermal Processes". Ed. JOHN WILEY & SONS, New York.
- Frigerio, E. y Saravia, L. (1991) "Emisividad Infrarroja de la Atmósfera. Medidas en el Noroeste Argentino". Anales de la Asociación Física Argentina, Vol. 3, Tucumán, Argentina.
- Incropera, F. P. and DeWitt, D. P. (1990) "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". Ed. JOHN WILEY & SONS, New York.
- Krarti, M.; Claridge, D. and Kreider, J. (1985) "Interzone Temperature Profile Estimation - Slab on Grade Heat Transfer Results". 23rd American Society of Mechanical Engineers (ASME) Heat Transfer Conference, Denver, CO ASME.
- Kronvall, J. (1980) "Correlating Pressurization and Infiltration Rate Data - Tests of an Heuristic Model". Lund Institute of Technology, Division of Building Technology, Lund, Sweden.
- Lesino, G.; Giménez, E. y Castro Padula, L. (1983) "Análisis del Confort Higrotérmico y Evaluación de los Recursos Climáticos del NOA". Actas de la VIII Reunión de ASADES, Sta. Rosa, La Pampa. Argentina.
- Mitalas, G. (1983) "Calculation of Basement Heat Loss". American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Transaction, Vol 89, pp. 420.
- Subbarao, K. (1988) "PSTAR - Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization: A Unified Approach to Building Energy Simulation and Short - Term Monitoring". Technical Report of Solar Energy Research Institute, 1617 Cole Boulevard, Golden, CO.