

SIMULACIÓN MEDIANTE PSTAR DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN PROTOTIPO DE VIVIENDA LIVIANA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA¹.A. Hernández y G. Lesino²Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO)
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA)
Calle Buenos Aires N° 177 - C.P. 4.400 - Salta
Tel. 0387-4255424 / 579 – Fax 0387-4255489 – e-mail: alejo@unsa.edu.ar

RESUMEN: El objetivo del presente trabajo es la evaluación del comportamiento térmico de un prototipo de vivienda mediante la aplicación del método de simulación macrodinámico PSTAR. El edificio, construido en la Universidad Nacional de Salta, fue monitoreado en Julio de 1993 siguiendo un protocolo específico propuesto por los autores del método. En trabajos anteriores se calcularon las admitancias térmicas teóricas a partir de una auditoría sobre las características constructivas del prototipo y se formalizaron las series temporales que gobiernan su comportamiento térmico siguiendo los lineamientos propios del PSTAR. En este trabajo se presentan los coeficientes obtenidos de la renormalización de los flujos primarios dentro de las ecuaciones de balance de energía y la simulación del edificio mediante las ecuaciones de balance renormalizadas. El error de ajuste promedio es de 1,5 °C, concluyéndose entonces que tanto el protocolo de monitoreo practicado como los resultados de la aplicación del PSTAR son aceptables.

Palabras clave: edificios, medición y simulación, validación.

INTRODUCCION

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 (alrededor de tres días) 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, etc.

La aproximación PSTAR combina microdinámica con macrodinámica para disgregar los flujos de calor en un cierto número de componentes útiles. Para un edificio de un solo local, bajo ciertas hipótesis, se puede escribir la siguiente ecuación de balance energético al tiempo t :

$$Q_{int}(t) = U [T_{int}(t) - T_{ext}(t)] + Q_{acum}^{in}(t) + Q_{acum}^{ext}(t) - Q_{sol}(t) + Q_{vent}(t) - Q_{aux}(t) + Q_{suelo}(t) + Q_{cielo}(t) \quad (1)$$

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 de calor debidas a la disminución de la temperatura de cielo.

¹ Trabajo financiado por CIUNSA

² Investigador de CONICET

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.

Asimismo, dado que el intercambio radiativo depende de la diferencia de las cuartas potencias de las temperaturas involucradas, debe efectuarse la linealización algebraica de este flujo.

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 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 mediante microsimulación (tipo SIMEDIF).
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 tres 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 periodo 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*.

La descripción detallada del prototipo simulado en este trabajo, el protocolo de monitoreo empleado, el equipo de medición y los datos medidos en Julio de 1993 figuran en un trabajo anterior (Hernández y Lesino, 1993), como así también su validación y simulación con SIMEDIF para condiciones meteorológicas de verano (Hernández y Lesino, 2000).

BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO ESTUDIADO

El prototipo, construido por la empresa Casas Contemporáneas S.A. mediante un convenio celebrado con el INENCO, está ubicado en un predio de la Universidad Nacional de Salta (UNSa), 8 km al norte del centro de la ciudad (24° 45' latitud sur y 65° 30' longitud oeste) sobre la Ruta Nacional N° 9 a la altura del km 1.607 y a 1.180 m.s.n.m. En la Figura 1 se observa una vista del prototipo desde la dirección SE.



Figura 1: Vista sureste del prototipo de vivienda liviano de la UNSa.

Conforman el edificio dos habitaciones contiguas rectangulares de 3,7 x 3 m de base cada una constituidas por muros de paneles premoldeados y ensamblados de 0,1 m de espesor compuestos de granulado volcánico aglutinado con cemento y rellenos con poliestireno expandido de 4 cm de espesor; contrapiso de cemento de 5 cm de espesor aislado térmicamente del suelo con el mismo poliestireno que los paneles; jaula antisísmica de hormigón convencional; techo de chapa galvanizada a un agua con pendiente al norte y cielorraso de metal desplegado castigado con cemento y aislado con poliestireno expandido de 2,5 cm de espesor con la misma pendiente del techo. El azimut del muro norte es de 164° (16° E) aproximadamente.

Entre el cielorraso y la chapa de cada local existen sendas cámaras de aire de 0,2 m de altura por toda el área de la habitación. Las aberturas exteriores consisten de una puerta y una ventana de dos hojas con vidrio simple en carpintería de madera y orientadas al sur por habitación no existiendo comunicación interna entre locales.

Los muros exteriores de la habitación que da al este están contruidos con paneles compuestos de cemento y granulado volcánico mientras que los de la habitación oeste contienen además arena lo que los hace más pesados y conductores del calor. El tabique que separa ambos locales está contruido con paneles premoldeados de cemento, granulado volcánico y arena alojando en su interior cuatro cavidades cilíndricas longitudinales de 5 cm de diámetro cada una.

ECUACIONES DE BALANCE DE ENERGIA Y RENORMALIZACION DE LOS TERMINOS PRIMARIOS

Debido a que el edificio está compuesto por cuatro locales deben resolverse, para cada paso de tiempo n , cuatro ecuaciones de balance energético acopladas. La nomenclatura empleada es la siguiente:

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

L_i : coeficiente global de pérdida estacionaria correspondiente a la admitancia V 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).

$Q_{i,j}^{accum}$: 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).

$S_{1E, 1N, 4N, 4O}$: ganancia solar en estado estacionario por parte de los locales 1 o 4 desde la orientación Este, Norte u Oeste.

$S_{2T, 3T}$: ganancia solar en estado estacionario por parte de los locales 2 o 3 desde la cubierta galvanizada.

$Q_{1E, 1N, 4N, 4O}^{accum}$: energía acumulada o cedida (si es negativa) por los muros exteriores de los locales 1 o 4 como consecuencia de la variación de la radiación solar colectada desde la orientación Este, Norte u Oeste.

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

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

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

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

T_i : temperatura del local (i).

T_a : temperatura ambiente.

$I_{E,N,O,T}$: radiación solar colectada en la dirección E, N, O o por el techo.

Sólo el local 1 tiene ganancia interna (proveniente del equipo de monitoreo) y pérdidas por infiltraciones mientras que sólo las cámaras de techo irradian hacia el cielo. Por otra parte sólo se entrega energía auxiliar a los locales 1 y 2, siendo también éstos los únicos que pierden energía por el suelo.

Así, para cada instante de tiempo n se dispone de las siguientes ecuaciones:

Balance de energía del local este:

$$Q_1^{int}(n) = L_1 T_1(n) - L_{1,a} T_a(n) - L_{1,2} T_2(n) - L_{1,4} T_4(n) - S_{1E} I_E(n) - S_{1N} I_N(n) + Q_{1,1}^{accum}(n) + Q_{1,a}^{accum}(n) + Q_{1,4}^{accum}(n) + Q_{1E}^{accum}(n) + Q_{1,N}^{accum}(n) + Q_{1,vent}^{accum}(n) - Q_{1,aux}^{accum}(n) + Q_{1,suelo}^{accum}(n) \quad (2)$$

Balance energético en la cámara de techo del local este:

$$0 = L_2 T_2(n) - L_{2,a} T_a(n) - L_{1,2} T_1(n) - L_{3,2} T_3(n) - S_{2T} I_T(n) + Q_{2,2}^{accum}(n) + Q_{2,a}^{accum}(n) + Q_{3,2}^{accum}(n) + Q_{2,cielo}^{accum}(n) \quad (3)$$

Balance energético en la cámara de techo del local oeste:

$$0 = L_3 T_3(n) - L_{3,a} T_a(n) - L_{4,3} T_4(n) - L_{2,3} T_2(n) - S_{3T} I_T(n) + Q_{3,3}^{accum}(n) + Q_{3,a}^{accum}(n) + Q_{2,3}^{accum}(n) + Q_{3,cielo}^{accum}(n) \quad (4)$$

Balance de energía del local oeste:

$$\begin{aligned} 0 = & L_4 T_4(n) - L_{4,a} T_a(n) - L_{4,3} T_3(n) - L_{4,1} T_1(n) - S_{4O} I_O(n) \\ & - S_{4N} I_N(n) + Q_{4,4}^{acum}(n) + Q_{4,a}^{acum}(n) + Q_{4,1}^{acum}(n) + Q_{4O}^{acum}(n) \\ & + Q_{4,N}^{acum}(n) - Q_{4,4}^{aux}(n) + Q_{4,suelo}(n) \end{aligned} \quad (5)$$

La metodología empleada para el cálculo de las admitancias térmicas y demás flujos participantes en estas ecuaciones figura en trabajos anteriores (Hernández y Lesino, 1993; Hernández y Lesino, 1994).

A los efectos de la renormalización de las ecuaciones de balance de energía, es necesario conocer el orden de magnitud de cada uno de sus términos a fin de clasificarlos en primarios y secundarios. De la inspección de los gráficos de estos flujos resultaron los siguientes coeficientes de renormalización:

p1: renormaliza al término $L_1 T_1(n)$	p2: renormaliza al término $L_2 T_2(n)$
p3: renormaliza al término $S_{2T} I_T(n)$	p4: renormaliza al término $L_4 T_4(n)$
P5: renormaliza al término $L_3 T_3(n)$	p6: renormaliza al término $S_{3T} I_T(n)$

Efectuándose la renormalización por mínimos cuadrados de las ecuaciones (2) a (5) sobre todo el período de monitoreo se obtuvieron los siguientes valores para los coeficientes de renormalización:

$$\begin{aligned} p1 &= 1,017 & p4 &= 1,086 \\ p2 &= 0,673 & p5 &= 0,645 \\ p3 &= 0,419 & p6 &= 0,404 \end{aligned}$$

Estos coeficientes cumplen con el criterio de estabilidad que impone la positividad de los mismos. Las cantidades p1 y p4 indican la bondad de los valores de las propiedades térmicas asumidas en la auditoría para los locales del prototipo. Sin embargo, no debe perderse de vista el hecho de que estos dos coeficientes incluyen los errores que se puedan haber cometido al calcular ciertos flujos como las ganancias solares, las infiltraciones y los flujos por suelo (no renormalizados).

Las cantidades p2 y p5 indican una sobreestimación de los flujos que renormalizan del orden del 35 % siendo bastante próximos entre si mientras que p3 y p6 evidencian una sobreestimación del orden del 60 % en los valores de auditoría de las ganancias solares por techos. Nuevamente estos cuatro coeficientes cargan con los errores cometidos en la estimación de los flujos por infiltraciones y por depresión de la temperatura de cielo, etc.

La elección de los flujos a renormalizar es crítica a la hora de cumplir con el criterio de estabilidad (coeficientes positivos) debiéndose trabajar con el menor número de coeficientes lo cual implica enmascarar algunos errores y obtener una ecuación de balance renormalizada con un error de ajuste fuertemente dependiente del criterio de selección de los flujos primarios.

SIMULACION DEL PROTOTIPO CON LAS ECUACIONES DE BALANCE RENORMALIZADAS

Una vez obtenidos los parámetros que renormalizan los términos primarios dentro de las ecuaciones de balance de energía, se procedió a simular los datos medidos mediante el uso de las ecuaciones renormalizadas. Los valores de temperatura ambiente y radiación solar empleados en la simulación corresponden a los valores obtenidos durante el monitoreo. Las incógnitas del problema son las temperaturas de los cuatro locales, T_1 , T_2 , T_3 y T_4 .

Si bien, en principio, las temperaturas de los cuatro locales están acopladas (lo que conduciría a un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas a resolver en cada paso temporal), el hecho de que las medianeras entre los locales 1 y 4 y entre las cámaras de techo 2 y 3 tengan un retardo de 2 horas hace que las dependencias de T_1 con T_4 y de T_2 con T_3 no sean instantáneas y que por lo tanto deban resolverse dos sistemas independientes de dos ecuaciones con dos incógnitas. El primer sistema corresponde al acople instantáneo entre el local este (T_1) y su cámara de techo (T_2) y el segundo al acople entre el local oeste (T_4) y su cámara de techo (T_3).

Para el desarrollo de los cálculos se confeccionó un programa en lenguaje QuickBasic V.4.0 titulado **Pstarliv.bas** el cual ingresa los datos meteorológicos, calores auxiliares y ganancias internas de calor a través de un archivo denominado *Datosliv.dat*. El Pstarliv calcula hora por hora cada uno de los términos involucrados en las cuatro ecuaciones de balance energético, ponderando los términos primarios con los coeficientes de renormalización correspondientes y resuelve los dos sistemas lineales de ecuaciones desacoplados. Finalmente, guarda los valores de T_1 , T_2 , T_3 y T_4 calculados hora por hora en un archivo denominado *Simulliv.dat*.

En la página siguiente se grafican los resultados de la simulación comparándolos con los valores medidos. Según se observa en la figura 2, los valores simulados para el local Este ajustan a los medidos dentro de un error promedio de 1,5 °C (por exceso o por defecto). Los valores simulados evidencian una mayor amplitud diaria respecto de los medidos, lo cual proviene del hecho de no haber renormalizado los flujos acumulados en la escasa masa del edificio. Esto se observa notoriamente durante el período de calefacción auxiliar en el cual la temperatura simulada se eleva 8 °C mientras que la medida se eleva sólo 5 °C, lo cual representa un exceso del orden del 60 % en los valores simulados dentro del intervalo de calefacción.

En cuanto a la cámara de techo el ajuste entre valores medidos y simulados es mejor que en el caso del local Este, salvo durante la primera mañana (que estuvo seminublada) y durante el período de calefacción. Dado que el cálculo de la radiación solar sobre el plano del techo fue estimada mediante el método de Liu – Jordan, los valores horarios estimados no coinciden con los verdaderos, no presentando la curva simulada los picos evidenciados por los valores medidos. La fuerte disminución de temperatura observada en la curva simulada a partir de las 5 a.m. (después de la primera noche) se debe a un brusco cambio en la emisividad del cielo como consecuencia del despeje de la cobertura nubosa. Esta emisividad influye directamente en la pérdida de calor por radiación al cielo. Durante el período de calefacción la cámara de techo se calienta más en la curva simulada que en la medida, lo que denota una mayor transferencia de calor a través del cielorraso por no haber sido renormalizado su coeficiente global de pérdida.

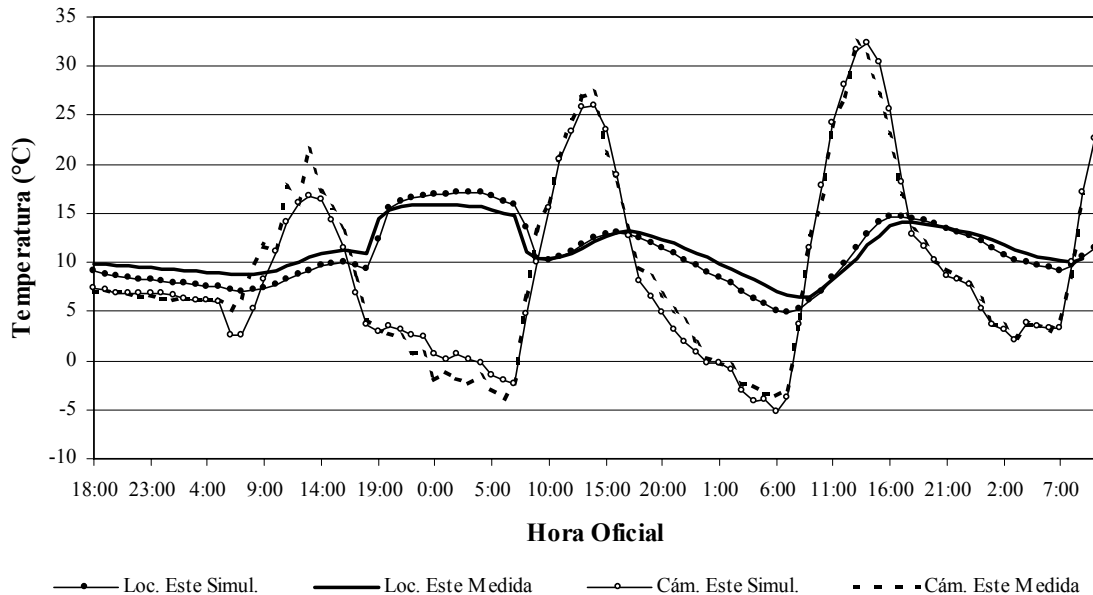


Figura 2: Comparación de valores medidos y simulados con PSTAR para el ala Este.

En el caso del local Oeste el desacuerdo entre valores medidos y simulados es del orden de 2 °C por exceso o por defecto según se aprecia en la figura 3. Nuevamente la amplitud térmica diaria en la simulación supera a la medida, observándose un desfase de una hora entre los mínimos de ambas curvas, lo cual es otra evidencia de la necesidad de renormalizar en este caso, además de los coeficientes de pérdida en estado estacionario, los términos de acumulación de calor dentro de la ecuación de balance de energía.

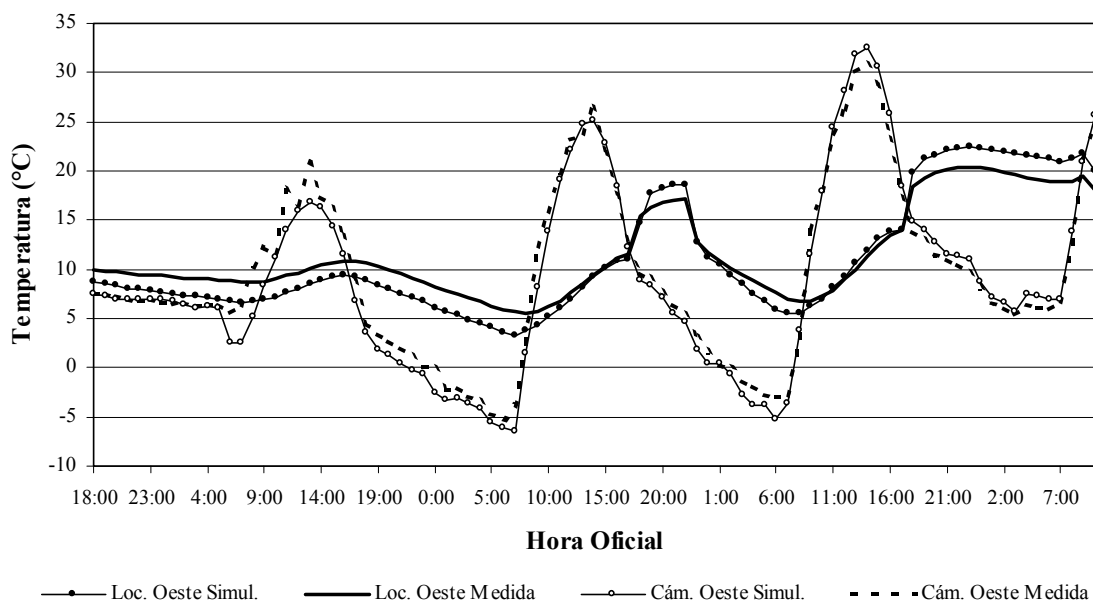


Figura 3: Comparación de valores medidos y simulados con PSTAR para el ala Oeste.

En el caso de la cámara de techo del local Oeste, las conclusiones de su estudio coinciden con las obtenidas en el análisis realizado para la otra cámara.

CONCLUSIONES

El método PSTAR permite evaluar, con aceptable precisión, la performance térmica a largo plazo de cualquier edificio mediante monitoreos de pocas variables y del orden de unos cuantos días. Dado que los métodos convencionales requieren para tal determinación monitoreos del orden de un año, su importancia resulta obvia.

Se aplicó el método a un prototipo de vivienda liviano estimándose, desde una auditoría, sus admitancias térmicas y solares, infiltraciones y demás flujos participantes de las ecuaciones de balance energético de cada local. A través del proceso de renormalización se obtuvieron parámetros del orden de la unidad para el caso de las pérdidas estacionarias en las habitaciones lo que indica un excelente acuerdo entre lo predicho y lo real, validándose así los algoritmos empleados para los cálculos. El acuerdo fue menor para el caso de las cámaras de techo debido a la dificultad de estimar sus infiltraciones, causa frecuente de importantes errores.

Con las ecuaciones de balance renormalizadas se procedió a realizar la simulación térmica del prototipo durante el período de monitoreo realizado en los primeros días del mes de Julio. De sus resultados se concluye que el error de simulación para el local Este es de $\pm 1,5$ °C y de ± 2 °C para el local Oeste, con mayor amplitud térmica diaria debido a la no renormalización de las masas de acumulación y con un desfase de 1 h entre las curvas medida y simulada en el local Oeste.

En el caso de ambas cámaras de techo el error de simulación es de ± 1 °C, con amplitudes algo menores y sin que se observe un desfase apreciable. Por ende, se consideran satisfactorios tanto el protocolo de monitoreo practicado como los resultados obtenidos al aplicar el método PSTAR a este edificio.

REFERENCIAS

- 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.
- Hernández A. y Lesino G., (1993), Análisis de la Performance Térmica de un Prototipo de Vivienda Liviana: Monitoreo y Simulación Macrodinámica. Parte I, Actas de la XVI Reunión de ASADES (Asociación Argentina de Energía Solar), 167 - 174, La Plata, Buenos Aires.
- Hernández A. y Lesino G., (1994), Análisis de la Performance Térmica de un Prototipo de Vivienda Liviana: Monitoreo y Simulación Macrodinámica. Parte II, Actas de la XVII Reunión de ASADES, Tomo II, 577 - 584, Rosario de Sta. Fe.
- Hernández A. y Lesino G., (2000), Simulación Mediante SIMEDIF del Comportamiento Térmico de un Prototipo de Vivienda Liviana Construido en la Universidad Nacional de Salta, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4 - N° 2, Sección 8, 29 - 34, ISSN: 0329-5184, Argentina.

ABSTRACT

The evaluation of the thermal behavior of a prototype building by simulation with PSTAR is presented. PSTAR is a macrodynamical simulation method developed by Subbarao et al. The building was monitored in July 1993 according to the protocol included in the method. In this paper the renormalization coefficients for the primary heat flows are presented and the renormalized equations are used to simulate the indoors temperatures. The mean error is 1,5 °C, considered acceptable.

Keywords: building, measurement and simulation, validation.