

# ANALISIS DE LA PERFORMANCE TERMICA DE UN PROTOTIPO DE VIVIENDA LIVIANA: MONITOREO Y SIMULACION MACRODINAMICA. PARTE II

Alejandro Hernández <sup>1</sup> y Graciela Lesino <sup>2</sup>

INENCO, Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional

Universidad Nacional de Salta - CONICET

Calle Buenos Aires N° 177. (4400) Salta.

TE/FAX (087)-251034

## Resumen

En un trabajo anterior [1] se describieron los resultados obtenidos del monitoreo de un prototipo de vivienda liviano construido en la Universidad Nacional de Salta. En el presente trabajo se aplicó el método PSTAR (Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization) para la evaluación de las propiedades térmicas del mismo.

Se incluye una descripción detallada del prototipo, del protocolo de medida y del equipo de monitoreo. Se presentan las ecuaciones de balance de energía de cada local y gráficos de los flujos considerados "primarios" dada su cuantía.

El proceso de renormalización evidenció un buen acuerdo entre los coeficientes globales de pérdida estacionaria estimados y reales de los locales habitables y cierta sobreestimación en los correspondientes a las cámaras de techo. Los flujos absorbidos por las masas resultaron muy pequeños en relación a los estacionarios.

Finalmente se aplicó el programa SIMEDIF para la evaluación de la constante de tiempo del prototipo.

## Ubicación geográfica y descripción del prototipo

El prototipo 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.

El clima de la región es de tipo templado cálido "a" según norma IRAM N° 11.603 [2] con inviernos soleados y rigurosos (escasas pero fuertes heladas) y veranos cálidos y lluviosos correspondiente a la provincia fitogeográfica del chaco serrano.

Conforman el edificio dos habitaciones contiguas rectangulares de 3,7 x 3 m de base cada una constituídas por muros de paneles premoldeados y ensamblados de 2,31 m de alto, 0,4 m de ancho y 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;

<sup>1</sup>Becario de perfeccionamiento de CONICET

<sup>2</sup>Investigador de CONICET

jaula antisísmica de hormigón convencional; techo de chapa galvanizada N° 26 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 paneles de los muros exteriores de la habitación que da al oeste y los de la medianera entre locales contienen arena lo que los hace más pesados y conductores del calor.

## Protocolo de monitoreo

Debido a que el prototipo no cuenta con instalación de gas natural el calentamiento auxiliar fue proporcionado por dos estufas a cuarzo verticales de 1200 W cada una. Fue suficiente una estufa por habitación.

La primera noche se calefaccionó sólo un local mientras el otro se enfriaba debido a la disminución de la temperatura ambiente y por la radiación nocturna al cielo. Durante la segunda noche de la experiencia correspondía calefaccionar el local oeste pero un desperfecto eléctrico apagó la estufa alrededor de medianoche. Esto obligó a modificar el protocolo previsto empleando una tercer noche para calefaccionar este local mientras se enfriaba el primero. Esto permitió obtener un buen salto térmico entre locales. El protocolo duró entonces cuatro días y tres noches. Esto denota la potencialidad del método ya que, en sólo unos pocos días y monitoreando una pequeño número de variables, permite evaluar la performance energética a largo plazo de cualquier edificio.

## El equipo de medición

El equipo de monitoreo consta de una PC XT transformada en dataloger mediante la incorporación de una fuente conmutada de tensión, diseñada completamente por personal del INENCO, que entrega +5, +12 y -12 V a partir de una batería de 12 V.

Como sistema de adquisición de datos lleva incorporada una tarjeta PCLAB 812 con 16 canales análogos para toma de datos. El software para su manejo está estructurado en lenguaje QuickBasic-Versión 4.0

Los sensores de temperatura son diodos semiconductores de circuito integrado tipo *zener programable* denominados LM335 cuya tensión de ruptura es directamente proporcional a la **temperatura absoluta** con una pendiente aproximada de 10 mV/°K y una constante de tiempo del orden de los 4 minutos.

Se utilizaron 5 de estos sensores para medir temperatura ambiente, de cada local y de sus respectivas cámaras de techo estando rodeados por sendos conos de papel de aluminio sin base y con perforaciones a fin de garantizar el sombreado y la ventilación de los mismos.

Se emplearon dos piranómetros KIPP & ZONEN para medir radiación global sobre

superficie horizontal uno y sobre superficie vertical al norte el otro.

La velocidad del viento, necesaria para la determinación de la conductancia térmica por infiltraciones, se midió mediante un anemómetro de cazoleta.

La humedad relativa, fundamental para el cálculo de las pérdidas térmicas por radiación hacia la temperatura de cielo, fue sensada en forma tridiurna mediante un psicrómetro manual.

Puesto que el protocolo de testeo determina la utilización de estufas calefactoras alimentadas con corriente eléctrica de red es necesario conocer en cada instante la tensión de la misma a fin de determinar la potencia disipada por las resistencias. A tal efecto se transformó la tensión alterna de red en continua de  $\sim 2$  V mediante un transformador y un divisor de tensión a fin de adecuarlo al nivel de señal de entrada a la PCLAB 812.

En definitiva, sólo 9 de los 16 canales análogos de la tarjeta fueron utilizados para la medición de performance del prototipo en estudio: 5 para medición de temperatura, 2 de radiación, 1 de tensión de red y 1 de velocidad de viento. El equipo se ubicó en la habitación que da al este.

### Cálculo de admitancias térmicas

Partiendo de las ecuaciones de balance de energía de cada local, el método PSTAR [3] permite determinar las expresiones de cada término correspondiente a las admitancias complejas térmicas y solares mediante un ajuste en frecuencias de las mismas que permite pasar al dominio de tiempo en el cual se efectúan las mediciones. Se determinan por separado los términos correspondientes a las infiltraciones y flujos radiantes hacia el cielo (previa linealización de los mismos), ganancias internas y de calefacción auxiliar.

Mediante una auditoría del prototipo se determinaron los valores teóricos (de tablas) de las propiedades térmicas de cada material involucrado.

Para el cálculo de las admitancias térmicas por muros y techos se empleó el programa ADMIT [1] desarrollado por el autor en lenguaje **Mathematica**.

Para la evaluación de las admitancias solares se optó por aplicar la metodología propuesta en [4] que se basa en el concepto de *temperatura sol-aire*.

Para la estimación de las admitancias correspondientes al suelo se empleó el método de Krarti y otros [5] incorporándolo al programa ADMIT. La evaluación de infiltraciones y flujos radiantes hacia la temperatura de cielo se efectuó mediante un programa en lenguaje QuickBasic V4.5 dada la simplicidad de las ecuaciones involucradas. El desarrollo del cálculo de estos dos flujos fue detallado en [1]. En ese trabajo se consideró el intercambio radiante entre la chapa galvanizada y el cuerpo negro "cielo" pero, dado que el método PSTAR no tiene en cuenta las temperaturas de las superficies sino las del aire circundante, debe estimarse la pérdida de calor al cielo desde el aire interior de la cámara de techo y no desde su cubierta. Por tanto, el coeficiente global de pérdida es el complejo entre el radiativo externo y el convectivo dentro de la cámara.

## Ecuaciones de balance de energía

El PSTAR es un método de simulación horaria del comportamiento térmico de edificios por lo que los datos deben ser tomados cada hora o menos.

La nomenclatura empleada en las ecuaciones 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 al 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.

$S_{3T,4T}$ : ganancia solar en estado estacionario por parte de los locales 3 o 4 desde la cubierta galvanizada.

$Q_{1E,1N,4E,4O}^{accum}$ : 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.

En el instante n las ecuaciones son las siguientes:

Ecuación 1: habitación que da al este (1)

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

Ecuación 2: cámara de techo de la habitación este (2)

$$\begin{aligned} 0 = & L_2 T_2(n) - L_{2,a} T_a(n) - L_{1,2} T_1(n) - L_{3,2} T_3(n) - S_{3T} I_T(n) + Q_{2,2}^{accum}(n) \\ & + Q_{2,a}^{accum}(n) + Q_{3,2}^{accum}(n) + Q_2^{cielo}(n) \end{aligned}$$

### Ecuación 3: cámara de techo de la habitación oeste (3)

$$0 = L_3 T_3(n) - L_{3,a} T_a(n) - L_{4,3} T_4(n) - L_{2,3} T_2(n) - S_{4T} I_T(n) + Q_{3,3}^{acum}(n) + Q_{3,a}^{acum}(n) + Q_{2,3}^{acum}(n) + Q_3^{cielo}(n)$$

### Ecuación 4: habitación que da al oeste (4)

$$0 = L_4 T_4(n) - L_{4,a} T_a(n) - L_{4,3} T_3(n) - L_{4,1} T_1(n) - S_{4O} I_O(n) - S_{4N} I_N(n) + Q_{4,4}^{acum}(n) + Q_{4,a}^{acum}(n) + Q_{4,1}^{acum}(n) + Q_{4O}^{acum}(n) + Q_{4N}^{acum}(n) - Q_4^{aux}(n) + Q_4^{suelo}(n) \quad (1)$$

## Renormalización de los términos primarios

Con los datos medidos se evaluaron hora por hora cada uno de los flujos intervinientes en las ecuaciones de balance de energía identificándose los términos primarios y secundarios de acuerdo a su cuantía. Si los valores de los parámetros térmicos asumidos desde la auditoría coincidieran con los de los materiales reales empleados en la construcción del prototipo, las ecuaciones de balance deberían cerrar con los valores deducidos desde las mediciones pero esto rara vez (o ninguna) es el caso. Por tanto se procedió a efectuar el ajuste de los términos primarios afectándolos por un juego de coeficientes a determinar mediante cuadrados mínimos ya que el sistema de ecuaciones resultante es rectangular (más filas que columnas). Esto constituye la "renormalización de los términos primarios".

En las figuras 1, 2 y 3 se presentan solamente los gráficos de flujos correspondientes al local este y su cámara de techo debido a que los correspondientes al ala oeste son del mismo orden.

Se advierte la escasa masa del prototipo (figura 2) en el pequeño monto de energía que cargan y descargan los muros al variar las temperaturas exterior e interiores.

De la inspección de los gráficos resultan los siguientes coeficientes de renormalización (con referencia a la ecuaciones (1)):

**p1:** renormaliza al término  $L_1 T_1(n)$

**p2:** renormaliza al término  $L_2 T_2(n)$ .

**p3:** renormaliza al término  $S_{3T} I_T(n)$

**p4:** renormaliza al término  $L_3 T_3(n)$ .

**p5:** renormaliza al término  $S_{4T} I_T(n)$

**p6:** renormaliza al término  $L_4 T_4(n)$ .

Efectuándose la renormalización por mínimos cuadrados de las ecuaciones (1) sobre todo el período de monitoreo se obtubieron los siguientes valores para los coeficientes de renormalización:

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

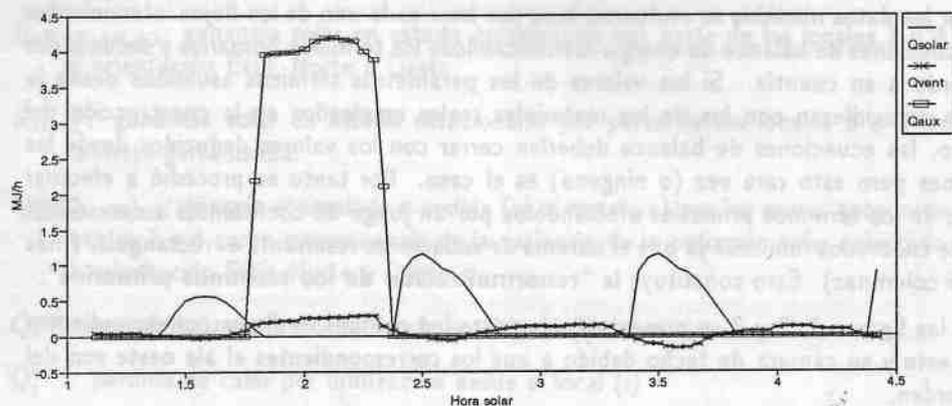
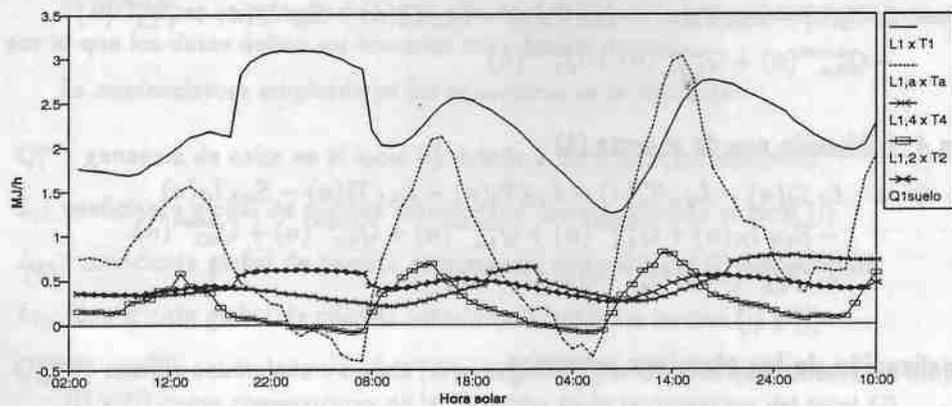


Figura 1: Flujos por temperatura, radiación solar e infiltraciones. Local este

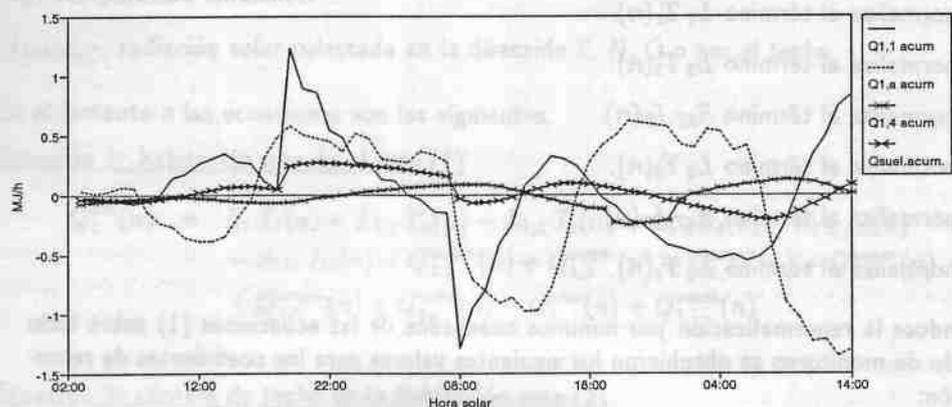


Figura 2: Energía que absorben y ceden las masas del local este

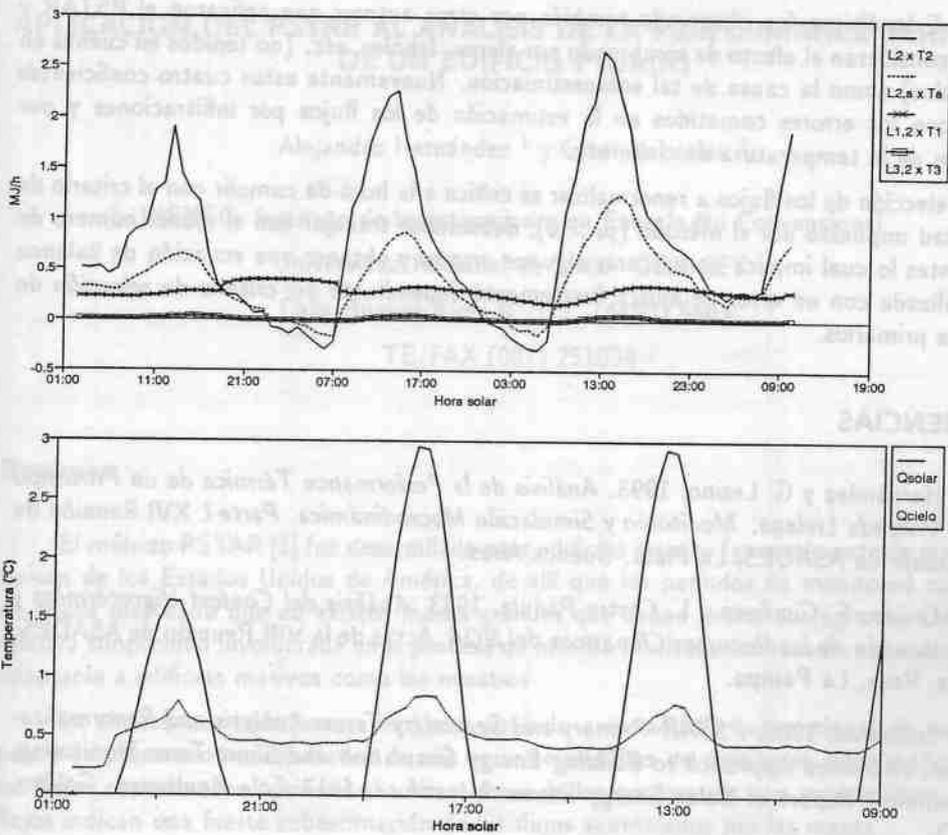


Figura 3: Flujos por temperatura, radiación solar y al cielo. Cámara de techo

### Calculos con SIMEDIF

Se aplicó el microsimulador SIMEDIF para determinar la constante de tiempo del prototipo, esto es, el tiempo que tarda en responder del 90 al 10% de un escalón descendente de 18 °C en la temperatura externa, sin radiación solar, partiendo de una condición estacionaria e isoterma entre adentro y afuera. Los resultados fueron 17,16 hs. considerando la infiltración medida y 22,84 hs sin infiltración lo que resalta la importancia de reducir al mínimo permisible esta clase de pérdida de calor.

### Conclusiones

Analizando los coeficientes de renormalización resultantes se concluye que se efectuó una buena elección de los valores de las propiedades térmicas desde la auditoría del prototipo (p1 y p6 próximos a 1). 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 p4 indican una sobreestimación de los flujos que renormalizan del orden del 35% siendo bastante próximos entre sí mientras que p3 y p5 evidencian una sobreestimación del orden del 60% en los valores de auditoría de las ganancias solares por

techos. Esto último fue observado también por otros autores que aplicaron el PSTAR y quienes consideran al efecto de sombreado por aleros, árboles, etc. (no tenidos en cuenta en los cálculos) como la causa de tal sobreestimación. 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 impuesto por el método ( $p_i > 0$ ), 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.

## REFERENCIAS

1. A. Hernández y G. Lesino, 1993. *Análisis de la Performance Térmica de un Prototipo de Vivienda Liviana: Monitoreo y Simulación Macrodinámica. Parte I.* XVI Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata, Buenos Aires.
2. G. Lesino, E. Giménez y L. Castro Pádula, 1983, *Análisis del Confort Higrotérmico y Evaluación de los Recursos Climáticos del NOA*, Actas de la VIII Reunión de ASADES, Sta. Rosa, La Pampa.
3. K. Subbarao, 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.
4. K. Subbarao and J. V. Anderson, 1983. *A Graphical Method for Passive Building Energy Analysis*, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 105, pp. 134-141.
5. M. Krarti, D. Claridge and J. Kreider, 1985, *Interzone Temperature Profile Estimation-Below Grade Basement Heat Transfer Results and Interzone Temperature Profile Estimation-Slab on Grade Heat Transfer Results*, 23<sup>rd</sup> American Society of Mechanical Engineers (ASME) Heat Transfer Conference, Denver, CO<sup>o</sup> ASME.