

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

Alejandro Hernández ¹ y Graciela Lesino

INENCO, Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional. Universidad Nacional de Salta - CONICET

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

1 RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la medición de performance energética de un prototipo de vivienda liviano construido con paneles ensamblados de granulado volcánico, cemento y arena, con cubierta de chapa galvanizada. Los datos serán tratados con el método de macrosimulación horaria PSTAR (Primary and Secondary Terms Analysis And Renormalization) desarrollado en el Solar Energy Research Institute, Colorado, U.S.A.

2 EL METODO PSTAR

Es un método de simulación horaria del comportamiento térmico de un edificio que permite extraer sus parámetros globales a partir de monitoreos de corto plazo (alrededor de tres días) midiendo pocas variables (temperatura interior, exterior, radiación solar, humedad y ganancias internas) [1]. 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.

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

¹ Becario de iniciación de CONICET

Q_{cielo} = pérdidas 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.

Cada uno de los términos en la ecuación de balance puede ser clasificado como *primario* o *secundario* de acuerdo a su magnitud. En el análisis de performance del edificio ya levantado (problema inverso), 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 la etapa de diseño consta de los siguientes pasos:

1. Cálculo de las admitancias en el dominio de frecuencia 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 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 sometándolo a ensayos de calentamiento y/o enfriamiento auxiliar debidamente planificados. Esto constituye lo que se denomina un *protocolo de monitoreo*.

3 ENSAYO DE UN PROTOTIPO DE VIVIENDA LIVIANO

3.1 CARACTERISTICAS DEL PROTOTIPO

El prototipo está ubicado en la Universidad Nacional de Salta (UNSa), 8 km al norte del centro de la ciudad (24°45' latitud sur y 65°30' longitud oeste) 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 (fuertes heladas) y veranos cálidos y lluviosos.

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; 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. En el cielorraso del local oeste existen tres aberturas cuadradas de 0,069 m² de área cada una, dos en la parte más baja y una en la más alta, las cuales permiten utilizar la cámara de techo como loop convectivo ingresando a la habitación el aire calentado bajo la cubierta de chapa durante el pico de radiación. Estas ventanillas pueden cubrirse con tapas de cemento alivianado.

Cada local tiene una puerta y una ventana de dos hojas con vidrio simple en carpintería de madera y orientadas al sur no existiendo comunicación interna entre locales. La figura 1 muestra esquemáticamente la planta del edificio y la 2 un corte del mismo donde se observa la ubicación de algunos sensores.

Los muros exteriores de la habitación que da al este están contruídos 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 contruído con paneles premoldeados de cemento, granulado volcánico y arena que alojan en su interior cuatro cavidades cilíndricas longitudinales de 5 cm de diámetro cada una. Los encastres de los paneles se adhieren con cemento no existiendo aislación térmica en estas uniones las que constituyen verdaderos puentes térmicos que aumentan el coeficiente global de pérdida del muro.

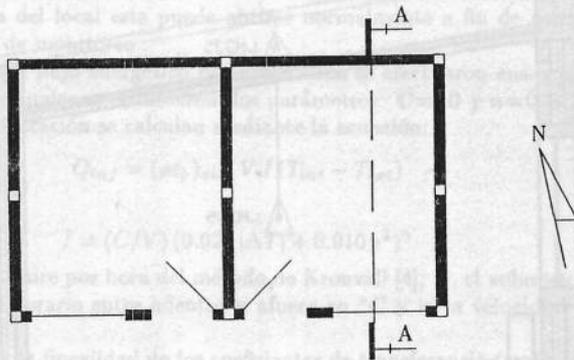


Figura 1: Esquema del prototipo liviano. Vista en planta

3.2 PROTOCOLOS DE MONITOREO

El calentamiento auxiliar es puramente eléctrico proveniente de estufas a cuarzo verticales de 1200 W cada una. Dada la poca masa térmica de la vivienda es suficiente una estufa por habitación para lograr el régimen a última hora de la noche. El protocolo diagramado es el siguiente:

1. Iniciando la medición a última hora de la tarde se monitorea durante una primer noche considerada de "iniciación" a fin de descartar la incidencia de la "historia" de los flujos anterior al inicio de las mediciones. A continuación sigue un día de libre fluctuación de las temperaturas interiores y exterior con buena radiación solar, una noche de calentamiento simultáneo de ambos locales iniciado al caer el sol, otro día de datos diarios, un período de enfriamiento nocturno y un último período diurno, finalizando el monitoreo a última hora de la tarde. Así, este protocolo dura tres días y dos noches.
2. Similar al anterior con la diferencia de que la primera noche se calefacciona sólo un local mientras el otro se enfría debido a la disminución de la temperatura ambiente y por la radiación nocturna al cielo y la segunda noche se calefacciona el otro local mientras se enfría el primero. Esto permite obtener un buen salto térmico entre locales lo que favorece la renormalización de la admitancia del tabique interior. Nuevamente el protocolo dura tres días y dos noches.

Por otra parte, dado que la habitación oeste dispone de un loop convectivo en su techo, se decidió aplicar los protocolos anteriores con las ventanillas abiertas una vez y cerradas otra vez a fin de analizar su eficiencia.

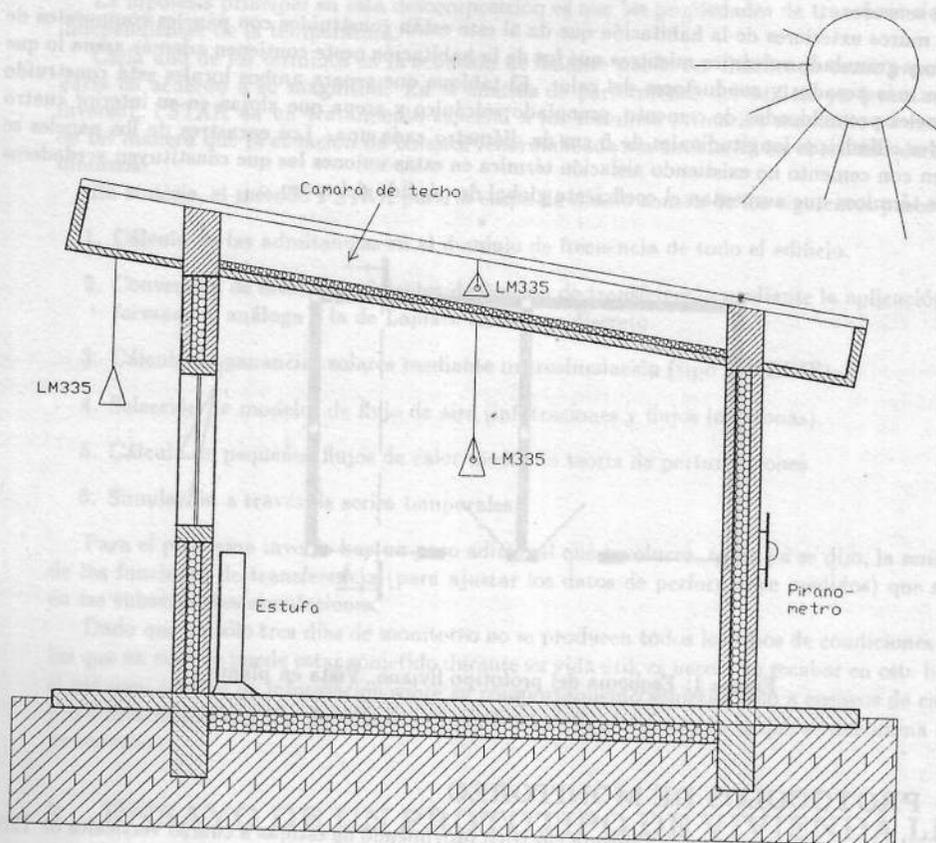


Figura 2: Prototipo liviano. Corte A-A

3.3 EL EQUIPO DE MEDICION

Consta de una PC XT transformada en datalogger mediante la incorporación de una fuente conmutada de tensión 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.

Los sensores de temperatura son diodos tipo *zener programable* denominados LM335 que actúan como fuentes de corriente y cuya tensión de ruptura es directamente proporcional a la **temperatura absoluta** con una pendiente aproximada de $10 \text{ mV}/^\circ\text{K}$. Se utilizan 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, como así también, el apantallamiento del intercambio radiativo infrarrojo con el entorno.

Dos piranómetros KIPP & ZONEN miden radiación global sobre superficie horizontal uno y sobre superficie vertical al norte el otro.

La velocidad del viento se mide mediante un anemómetro de cazoleta integrándose los datos cada 2,5 min. mientras que su dirección se registra mediante la observación tridiurna (mañana, mediodía y tarde) de la veleta.

La humedad relativa se sensa también en forma tridiurna mediante un psicrómetro manual.

La potencia disipada por las resistencias se determina midiendo la tensión alterna de red para lo cual se la transforma en continua de ~ 2 V mediante un transformador y un divisor de tensión a fin de adecuarlo al nivel de señal de entrada a la PCLAB 812 y se calibra la salida del transformador-divisor entre 10 y 250 V de tensión de entrada.

En definitiva, sólo 9 de los 16 canales análogos de la tarjeta son 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.

3.4 FLUJO POR INFILTRACIONES

A fin de disminuir las infiltraciones se sellaron las ventanas de ambas habitaciones y la puerta del local oeste mientras que la del local este puede abrirse normalmente a fin de comprobar el normal funcionamiento del equipo de monitoreo.

Para la determinación del flujo energético por infiltración se efectuaron ensayos de presurización en el local este [3] desde los cuales se obtuvieron dos parámetros: $C=40$ y $n=0.5$.

Así, las pérdidas por infiltración se calculan mediante la ecuación:

$$Q_{inf} = (\rho c_p)_{aire} V I (T_{int} - T_{ext}) \quad (2)$$

donde:

$$I = (C/V) (0.026 |\Delta T| + 0.010 v^2)^n \quad (3)$$

es la tasa de renovaciones de aire por hora del método de Kronvall [4]; V , el volumen de la habitación; ΔT el salto térmico medio horario entre adentro y afuera en $^{\circ}C$ y v , la velocidad del viento media horaria en m/s.

El método PSTAR exige la linealidad de los coeficientes de transferencia (trata las no linealidades en forma perturbativa) por lo que para el cálculo de I se empleó un ΔT y v promediados en el período de monitoreo. En la Sección 5 se compara el flujo por infiltración linealizado con el instáneo gobernado por (3).

3.5 FLUJO RADIANTE AL CIELO

Para el cálculo de las pérdidas por radiación hacia la temperatura de cielo es necesario conocer la emisividad infrarroja de la atmósfera, la cual depende de la temperatura de rocío mediante la siguiente expresión, válida para la localidad de Salta:

$$\epsilon = 0.767 + 0.55 (tr/100) - 0.26 (tr/100)^2 \quad (4)$$

donde tr es la temperatura de rocío en $^{\circ}C$ determinada mediante mediciones tridiurnas de temperaturas de bulbo seco y húmedo.

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

$$Q_{cielo} = 1.74 \times 10^{-3} (T_c^4 - \epsilon T_a^4) \text{ Joule/h} \quad (5)$$

para el área y la emisividad de la cubierta del local que da al este siendo T_c su temperatura y T_a la ambiente, ambas en $^{\circ}K$.

La linealización de este flujo se obtiene definiendo el coeficiente radiativo

$$h_r = 1.74 \times 10^{-3} (\bar{T}_c^2 + \epsilon^{1/2} \bar{T}_a^2) (\bar{T}_c + \epsilon^{1/4} \bar{T}_a) \quad (6)$$

donde \bar{T}_c y \bar{T}_a son los promedios en el período de monitoreo de T_c y T_a , resultando:

$$Q_{cielo} = h_r (T_c - \epsilon^{1/4} T_a) \quad (7)$$

En la Sección 5 se comparan los flujos dados por las ecuaciones (5) y (7).

Debido a que el método PSTAR no considera las temperaturas de las superficies sino las del aire (interior y exterior), se debió estimar numéricamente la temperatura de la cubierta en función de las del local y de la cámara de techo, determinando los coeficientes peliculares en forma iterativa bajo la hipótesis de que la temperatura de la cámara es el promedio entre las de la cubierta y el cielorraso. Si esto no es así, quedará reflejado en la renormalización.

4 EL PROGRAMA ADMIT

A fin de facilitar los cálculos requeridos por el PSTAR se está desarrollando un programa denominado ADMIT estructurado en lenguaje Mathematica el cual efectúa las siguientes tareas:

1. Determinación de las admitancias térmicas teóricas (auditoría) de muros compuestos de hasta dos materiales distintos en el dominio de frecuencia y obtención de las admitancias del edificio entero mediante la suma de las correspondientes a cada pared, tabique y techo componentes [5].
2. Transformación de estas admitancias a cocientes de polinomios en z^{-1} de orden especificado por el usuario.
3. Análisis de las raíces de los polinomios a fin de determinar si cumplen con el criterio de estabilidad (z positivos y menores que la unidad). Si alguna raíz lo viola, el programa solicita el ingreso de un nuevo juego de frecuencias.
4. Gráfica simultánea de las admitancias teóricas y ajustadas con polinomios a fin de comprobar la bondad del ajuste. Si el acuerdo no es satisfactorio puede reintentarse el cálculo con un nuevo juego de frecuencias.
5. Pasaje al dominio de tiempo mediante la descomposición en fracciones simples de las admitancias polinómicas.
6. Cálculo de las admitancias del suelo para frecuencia anual [6].

La validación del programa se efectúa mediante la resolución de ejemplos presentados por K. Subbarao [1].

A fin de obtener la respuesta del edificio a la radiación solar se empleará el microsimulador SIME-DIF mientras que para la renormalización de los flujos primarios se puede desarrollar un programa en lenguaje Mathematica o Matlab.

5 RESULTADOS OBTENIDOS

Hasta la fecha se han realizado cinco series de medida presentándose los resultados de la segunda en la que se aplicó el protocolo de monitoreo 2 con ventanillas de loop de techo cerradas desarrollada entre los días 5 y 9 de julio.

Durante la primer noche siguiente a la de iniciación se calefaccionó el local este lo que se manifiesta en el importante escalón que registra su temperatura, mientras que la noche en que correspondía calefaccionar el local oeste un desperfecto sacó de servicio la estufa alrededor de las 24 hs., lo que obligó a modificar el protocolo de medida calefaccionando esta habitación la noche siguiente. Dada la escasa masa térmica del prototipo, ambos locales se enfrían rápidamente luego de apagarse las estufas.

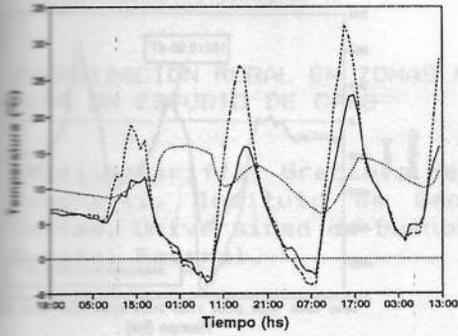
Se advierte en las gráficas que el salto térmico entre locales es importante durante casi todo el período de evaluación lo que es propicio para la correcta determinación de las admitancias de las paredes y cielorrasos que relacionan los módulos entre sí. Este es uno de los principales objetivos del protocolo de monitoreo.

Luego de una noche nublada, manifestada por la pequeña caída en la temperatura ambiente, comenzó a despejarse al amanecer lo que produjo una fuerte disminución en la temperatura de cielo. Durante ese día la nubosidad fue variable mejorando estas condiciones hacia el atardecer. Finalmente se sucedieron dos días claros.

Dada la época del año (invierno) y la escasa humedad ambiente se registraron diferencias de casi 20°C entre la temperatura ambiente y la de cielo (esta última es estimada, no medida) dando lugar a importantes pérdidas radiativas manifestadas en la inversión térmica nocturna (menor temperatura que la ambiente) ocurrida en ambas cámaras de techo según se aprecia en las dos primeras figuras de la página siguiente.

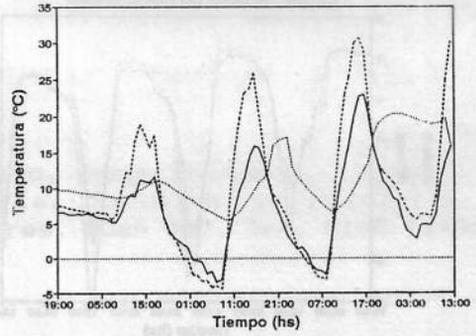
En la gráfica correspondiente a la radiación solar se observa que el máximo correspondiente al muro norte ocurre una hora antes que el correspondiente al plano horizontal debido a la leve orientación al este que posee el edificio.

Temperaturas del local este



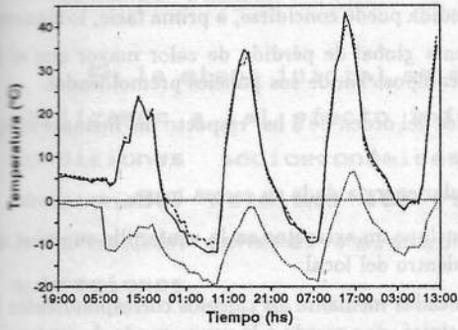
— Ambiente Camara de techo - - - - - Habitación

Temperaturas del local oeste



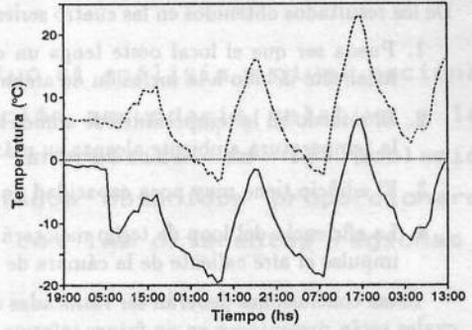
— Ambiente Camara de techo - - - - - Habitación

Temperatura de cubiertas galvanizadas



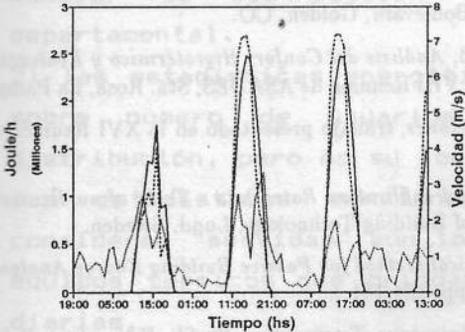
— Local este Local oeste - - - - - Temp. de Cielo

Compar. entre temp. ambiente y de cielo



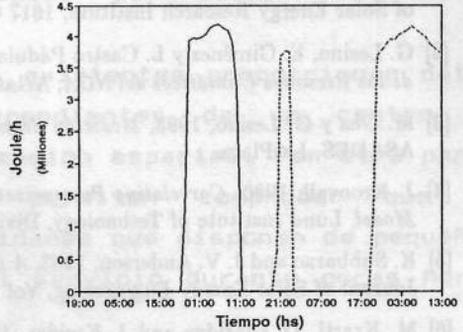
..... Ambiente — Cielo

Radiación solar y viento



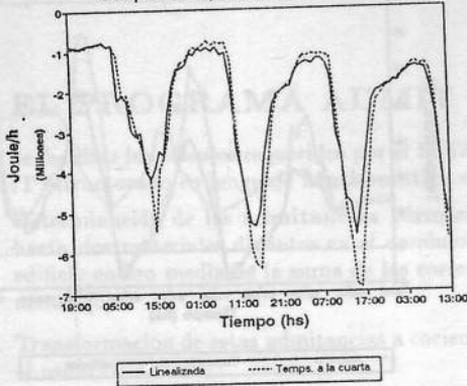
— Rad.sup.horiz Rad.sup.vert - - - - - Viento

Energía entregada por las estufas

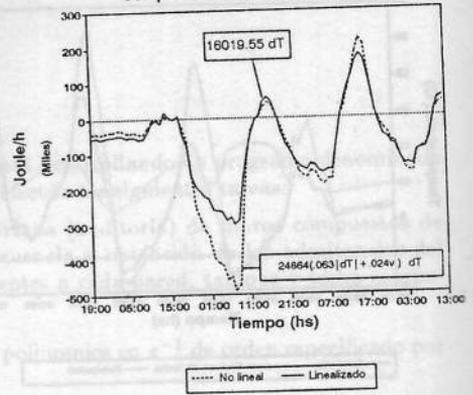


— Local este Local oeste

Compar. de flujos por radiac. al cielo



Comparacion de flujos por infiltracion



6 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en las cuatro series de medida puede concluirse, a prima facie, lo siguiente:

1. Pueda ser que el local oeste tenga un coeficiente global de pérdida de calor mayor que el del local este debido a la inclusión de arena en la composición de sus paneles premoldeados.
2. El retardo en la temperatura de ambos locales es del orden de 3 hs. respecto del instante en que la temperatura ambiente alcanza su máximo.
3. El edificio tiene muy poca capacidad de acumular energía dada su escasa masa.
4. La eficiencia del loop de techo mejorará si se incluye un extractor en la ventanilla superior que impulse el aire caliente de la cámara de techo dentro del local.

Estas conclusiones deberán ser ratificadas o rectificadas mediante los cálculos correspondientes los cuales serán presentados en un futuro informe que incluirá, de acuerdo a lo programado, la evaluación de performance energética de un edificio masivo para lo cual deberá aplicarse un protocolo de monitoreo adecuado dado que el tiempo necesario para su entrada en régimen puede extender el período de tres días previstos para el monitoreo de edificios livianos.

Referencias

- [1] 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.
- [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] M. Gea y G. Lesino, 1993, *Medición de infiltraciones*, trabajo presentado en la XVI Reunión de ASADES, La Plata.
- [4] J. Kronvall, 1980, *Correlating Pressurization and Infiltration Rate Data - Tests of an Heuristic Model*, Lund Institute of Technology, Division of Building Technology, Lund, Sweden.
- [5] 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.
- [6] M. Krarti, D. Claridge and J. Kreider, 1985, *Interzone Temperature Profile Estimation-Slab on Grade Basement Heat Transfer Results and Interzone Temperature Profile Estimation-Slab on Grade Heat Transfer Results*, 23rd American Society of Mechanical Engineers (ASME) Heat Transfer Conference, Denver, CO ASME.