

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE EDIFICIOS APLICANDO EL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

N. Muñoz¹, B.M. Marino², L.P. Thomas²

Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales, Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA)
Tel. 0249-4385660 Int. 122 – E-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

Recibido 10/08/16, aceptado 09/10/16

RESUMEN: Se presenta una metodología para evaluar el comportamiento térmico de una construcción representativa del centro bonaerense. Esta consiste en la resolución del “problema inverso” mediante la aplicación del modelo de regresión lineal múltiple para obtener los valores de los parámetros térmicos globales del edificio a partir de mediciones de temperatura y humedad en el interior y de los parámetros meteorológicos externos. Previamente el mismo problema fue resuelto en forma secuencial para estimar la variación de la temperatura interna generada por la conductividad de la envolvente, la radiación solar y la convección debida al viento. Se muestra aquí que el orden de la secuencia elegida cambia los resultados. En cambio, el modelo de regresión lineal múltiple permite correlacionar todas las variables simultáneamente. La importancia relativa de cada proceso de transferencia de calor es determinada mediante el valor relativo de los coeficientes de correlación.

Palabras clave: evaluación térmica de construcciones, modelo de caja gris inverso, regresión lineal múltiple, procesos de transferencia de calor.

INTRODUCCIÓN

La norma IRAM 11601 (2002) en Argentina, así como otras internacionales (ASHRAE, 2001; CIBSE, 2015, etc.), establecen los valores de los parámetros característicos de los materiales de construcción y la forma de calcular los flujos del calor a través de la envolvente edilicia debidos a los diferentes procesos de transferencia para las distintas zonas bioclimáticas. La norma IRAM 11900 determina la categoría de la construcción entre los niveles A y H según la eficiencia de la aislación. En la provincia de Buenos Aires, los estándares asociados con el acondicionamiento térmico de edificios conducente a un consumo energético reducido en invierno son establecidos por la Ley N°13059 y el Decreto 1030/2010. Además, la norma IRAM 11659-2 establece valores admisibles de calidad térmica para edificios con sistemas de refrigeración.

Según estas normas, útiles durante la etapa de diseño, la respuesta térmica de una construcción se halla integrando el comportamiento térmico individual de las distintas componentes constructivas de la envolvente (muros, aberturas, techos, etc.) determinando, para cada una de ellas, la contribución de cada proceso de transferencia de calor (conducción, convección, radiación) en forma independiente. La integración se basa en el principio de superposición según el cual el flujo de calor total se determina sumando los flujos de calor a través de cada componente y para cada proceso de intercambio. Como consecuencia, quedan establecidas las ecuaciones diferenciales y/o integrales que rigen los procesos de transferencia de calor. El comportamiento térmico, incluso en el régimen no

¹ Becaria doctoral ANPCyT

² Investigador Independiente CONICET

estacionario, puede evaluarse resolviendo las ecuaciones con las condiciones iniciales y de contorno adecuadas. Si no es posible obtener una solución analítica, se recurre a códigos de simulación como *Simusol*, *Simedif*, *Autodesk*, *Ecotect*, *Energy Plus*, etc. (Tian y Love, 2009; Di Bernardo et al., 2011; Suarez, 2012; Garzón y Mendonça, 2012; Raftery et al., 2012; Boutet et al., 2013; etc.).

El procedimiento empleado se conoce en matemática como resolución del *problema directo* (Fig. 1). Un aspecto crítico del cálculo es el conocimiento de los valores de los parámetros físicos y coeficientes semi-empíricos presentes en las ecuaciones y de sus incertezas. Si bien estos valores son provistos por las normas IRAM para materiales y aberturas típicas, pueden diferir de los valores reales ante la presencia de pérdidas o ganancias de calor imprevistas o por la ocurrencia de otros factores difíciles de cuantificar asociados con la envolvente, el entorno o el clima local. Además, los mecanismos de transferencia de calor y la respuesta térmica de los diferentes componentes constructivos no son completamente independientes entre sí. En efecto, en el intercambio de calor entre una superficie y el ambiente se solapan los flujos radiativos y convectivos, debiendo considerarse la absorción de onda corta en la radiación (ya sea la procedente del sol o de las fuentes presentes), la de onda larga originada en las superficies del entorno exterior, y la radiación infrarroja emitida por la superficie interna y reflejada por el resto de los elementos. La radiación y los flujos convectivos de calor dependen del movimiento del aire impulsado por el viento y por diferencias de densidad. En la transmisión de calor por conducción debe considerarse la existencia de puentes térmicos. La conducción también es afectada por la generación transitoria de sumideros y fuentes de calor por pérdida o acumulación de energía en el interior de las paredes. Además, estos procesos vinculan los diferentes elementos de la construcción en una forma difícil de determinar.



Figura 1: Etapas de la resolución directa (líneas negras) e inversa (líneas rojas) del problema asociado a la caracterización térmica de un edificio.

Un modo alternativo de análisis consiste en resolver el *problema inverso* para obtener los valores de los parámetros del modelo e información general de los procesos físicos a partir de los resultados o consecuencias (Fig. 1). Esta técnica es útil también para validar o corregir los valores de los parámetros empleados si estos fueran conocidos, o para obtener información complementaria del problema que se intenta resolver. Si bien existen numerosos métodos para encarar los problemas inversos de la matemática y la física (Tarantola, 2005), se encuentran escasas referencias de casos aplicados al comportamiento térmico de las construcciones. Un primer paso en este sentido fue dado por Muñoz et al. (2014), quienes usaron información teórica general y las mediciones realizadas durante 60 días de la temperatura interna del edificio evaluado, de la temperatura exterior y de la intensidad de la radiación solar. Desde un punto de vista matemático, ellos emplearon el modelo de caja gris inverso (Berthou et al., 2014; Whiten, 2013; Bohlin, 2006; Braun y Chaturvedi, 2002) que combina una estructura teórica parcial con datos para completar la información faltante (es decir, los detalles de la construcción y de la interacción de los procesos físicos). Así, determinaron cada una de las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior. Primero se analizó la correlación de la variación de la temperatura interna del edificio evaluado con la diferencia entre las temperaturas externa e interna; luego, con la intensidad de la radiación solar y finalmente con la intensidad del viento. Estas variables corresponden a los procesos físicos de la conducción térmica a

través de la envolvente, del calentamiento por radiación solar y de la transferencia convectiva de calor por acción del viento. De esta manera, ellos evaluaron el comportamiento térmico global de la construcción, i.e. la respuesta conjunta de los diferentes elementos constructivos, concluyendo que el modelo de regresión lineal es suficiente para determinar la dependencia de cada mecanismo de transferencia analizado. Los valores encontrados de los parámetros característicos fueron cotejados favorablemente con los obtenidos por medio del problema directo (es decir, con los calculados por las normas IRAM). No obstante, el método no permite analizar todos los procesos físicos simultáneamente, ya que previamente debe establecerse un orden para realizar el análisis. Aplicándolo a diferentes bases de datos, se encontró que la inadecuada elección de este orden puede dar lugar a resultados erróneos.

En este trabajo se presenta una solución a este inconveniente. La misma consiste en emplear el modelo de *regresión lineal múltiple* (RLM) que permite relacionar linealmente los datos con varias variables simultáneamente. El modelo RLM puede aplicarse a una base de datos disponible para desarrollar modelos de predicción, validarlo con mediciones in-situ y compararlo con simulaciones y metodologías propuestas para certificación energética de edificaciones y/o normas técnicas y obtener altos coeficientes de correlación (Tiberiu et al., 2013; Salvetti *et al.*, 2010; Iordache y Iordache, 2006; Sander et al., 1993; O'Neill et al., 1991). Los valores de los parámetros edificios se encuentran minimizando la suma S del error cuadrático medio e_j de las diferencias entre el valor medido y el aproximado de n mediciones, es decir $S = \sum e_j^2$ con $1 \leq j \leq n$. Se analiza la variación de la temperatura interna generada por la diferencia térmica con el exterior, la intensidad de la radiación solar y la intensidad del viento como en el trabajo de Muñoz et al. (2014) pero, puesto que el número de variables consideradas en el modelo RLM no tiene límite, se agrega también la diferencia de humedad absoluta entre el interior y el exterior. Las variables corresponden a los procesos de conducción térmica a través de la envolvente, radiación solar, acción convectiva del viento, y calor latente del aire intercambiado con el exterior (o ventilación). La hipótesis básica en la que se sustenta el método es que cada una de estas variables da cuenta de un proceso físico lineal en primera aproximación.

MODELADO ANALÍTICO

Marco teórico general

El modelo de caja gris empleado considera al edificio evaluado como un espacio que contiene aire y elementos a temperatura uniforme T_i que varía con el tiempo. En el exterior, la temperatura T_e también varía con el tiempo. Como en general es $T_e \neq T_i$, se produce un intercambio de calor por conducción a través de la envolvente. La Ley de Fourier indica proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura. La inercia térmica de las paredes amortigua los efectos de los cambios externos de temperatura y surge un retardo temporal δt entre los máximos de T_e y T_i . Puesto que Muñoz et al. (2014) mostraron que δt es despreciable en el mismo edificio, puede inferirse que los efectos relacionados con la inercia térmica de la envolvente en su conjunto (y con la amortiguación del flujo de calor) no son significativos. Esto se debe, principalmente, a la alta proporción de paneles vidriados con inercia térmica despreciable que componen la envolvente. Cuando T_e y T_i varían en una escala de tiempo mucho mayor que el tiempo de difusión del calor en las paredes, la transferencia de calor resulta cuasi-estacionaria, es decir que puede aproximarse a la de una sucesión de estados estacionarios que se verifican instante a instante.

Si $(T_e - T_i) > 0$ y se establece un flujo de calor $Q > 0$ hacia el interior, se tiene que

$$Q(t) = U(T_e - T_i) \quad (1)$$

donde U es la transmitancia térmica global del edificio. La distribución del calor ingresado aumenta T_i . La relación entre $Q(t)$ y el aumento de temperatura es

$$Q(t) = m C_p \frac{dT_i}{dt} \quad (2)$$

donde m es la masa y C_p es el calor específico de los elementos que se encuentran en el interior del edificio; mC_p es la capacidad calorífica o masa térmica global del edificio. Igualando (1) y (2) se obtiene la siguiente ecuación diferencial simple

$$\tau \frac{dT_i}{dt} = T_e - T_i \quad \text{con} \quad \tau = \frac{mC_p}{U} \quad (3)$$

El parámetro τ , asociado a la inercia térmica, es el tiempo de respuesta característico de la edificación frente a variaciones de la temperatura externa. Notar que los parámetros m , C_p y U , en función de los cuales se define τ , no son significativos por sí mismos sino que es la relación entre la masa térmica del edificio y la transmitancia térmica de su envolvente la que importa.

Por otra parte, la radiación solar que ingresa a través de las superficies vidriadas es retenida en el interior por efecto invernadero o, indirectamente, incrementando el flujo de calor por conducción en una magnitud superior a la debida a ΔT mediante la elevación de la temperatura de las fachadas y cubiertas no vidriadas. La ecuación para calcular el flujo de calor a través de los cerramientos vidriados requiere, como datos de partida, la radiación neta incidente, su ángulo de incidencia y el coeficiente de absorción de la radiación solar de la superficie externa expuesta, entre otros (Davis, 2004). Muñoz et al. (2016) muestran, para el mismo caso de estudio, que la radiación solar es importante incluso en invierno.

El viento aumenta la disipación de energía en la envolvente (al actuar sobre la capa límite superficial de aire que envuelve el edificio) y afecta la renovación del aire a través de las aberturas o la infiltración por las rendijas de puertas y ventanas. Estos efectos dependen del tipo de superficie, el área expuesta, el ángulo entre cada fachada y la dirección del viento, las características aerodinámicas y los obstáculos cercanos (otros edificios, árboles, vehículos, etc.) interpuestos al viento, ΔT , la humedad del aire, etc. El caudal de renovación, además, depende de la permeabilidad de las carpinterías para una determinada diferencia de presión entre el exterior y el interior (Davis, 2004).

Para superar la complejidad de los cálculos implicada por los efectos de la radiación solar y la acción del viento, se recurre a la hipótesis por la cual ambos efectos generan un flujo de calor proporcional, en primera aproximación, a la intensidad I_r (Wm^{-2}) de la radiación incidente, a la intensidad del viento u (ms^{-1}), y a la diferencia de humedad absoluta H . Sumando otras posibles fuentes internas de calor f , la Ec. (3) se transforma en

$$\frac{dT_i}{dt} = aI_r + b(T_e - T_i) + cu + d(H_e - H_i) + f \quad (4)$$

donde el orden de las variables fue elegido para facilitar la presentación de los resultados. Los coeficientes a , b , c , d y f no dependen de ΔT , de la radiación o de la velocidad del viento, pero si obedecen a otros factores tales como la inclinación del sol a mediodía, las características aerodinámicas, etc. Tienen unidades y, dependiendo de las elegidas, pueden encontrarse notables diferencias entre sus valores. Aunque el método propuesto no depende de la elección de unidades, de aquí en adelante se considera que las variables de Ec. (4) están adimensionalizadas con sus respectivos valores máximos. De esta forma, el valor numérico de los coeficientes indica la importancia relativa de los procesos para generar la misma variación de la temperatura interior.

Los valores medidos de temperatura y humedad en el interior del edificio evaluado y aquellos proporcionados por las estaciones meteorológicas conforman una serie de n conjuntos de datos para un mismo tiempo. La metodología propuesta por Muñoz et al. (2014) consiste en encontrar la regresión lineal de dT_i/dt a partir de los datos, con respecto a la variable que aparece en el primer término del miembro derecho de (4), o sea I_r . La pendiente de la recta que mejor ajusta los datos experimentales es el valor del coeficiente a . Luego se realiza la regresión lineal de $dT_i/dt - (a \cdot I_r + s)$, donde s es la ordenada al origen, en función de la segunda variable, ΔT , para encontrar b , y así sucesivamente. Identificando cada conjunto con el índice $j = 1, 2, \dots, n$, los coeficientes así hallados dan una aproximación al valor medido de dT_i/dt con el siguiente error

$$e_j = \left. \frac{dT_i}{dt} \right|_j - (aI_r + b\Delta T + cu + d\Delta H + f)_j \quad (5)$$

donde f es la suma de las ordenadas al origen s de las regresiones lineales. El resultado no depende del orden si todos los procesos físicos asociados son completamente independientes entre sí. Por el contrario, y como ocurre en realidad, si los procesos fuesen dependientes en alguna medida, las variables resultan dependientes una de otra y entonces el resultado depende del orden en el que se ajustan los coeficientes. Una forma de resolver este problema es aplicando el modelo RLM.

Solución aplicando el modelo de Regresión Lineal Múltiple

Si la variable dependiente dT_i/dt es una función lineal de las variables independientes (ΔT , I_r , u , ΔH) y e es el error o perturbación aleatoria, el resultado de $j = 1, 2, \dots, n$ mediciones puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{dT_i}{dt} \right|_1 \\ \vdots \\ \left. \frac{dT_i}{dt} \right|_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (T_e - T_i)_1 & I_{r1} & u_1 & (H_e - H_i)_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & (T_e - T_i)_n & I_{rn} & u_n & (H_e - H_i)_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

En notación matricial, Ec. (6) se representa como

$$Y = XB + E \quad (7)$$

donde Y , B , E son los vectores de la variable dependiente, de los coeficientes y de los residuos, respectivamente, mientras X es la matriz de datos. El modelo RLM consiste en encontrar los parámetros a , b , c , d , f que minimizan la suma S del error cuadrático medio de todos los datos. Por comodidad definimos el vector asociado $\hat{Y} = XB$ derivado del modelo. Así, la diferencia entre los valores observados Y y los valores estimados \hat{Y} es el vector residuo $E = (Y - \hat{Y}) = (Y - XB)$. El mínimo de la función escalar

$$S(B) = E^T E = (Y - XB)^T (Y - XB) \quad (8)$$

se encuentra derivándola e igualándola a cero:

$$\frac{d}{dB} S(B) = \frac{d}{dB} (Y - XB)^T (Y - XB) = -2X^T Y + 2X^T XB = 0 \quad (9)$$

donde el supraíndice T representa la matriz transpuesta. Despejando, se obtiene:

$$X^T Y = X^T XB \quad (10)$$

Si $X^T X$ es una matriz no singular, es decir que los datos son independientes entre sí, existe una matriz inversa $(X^T X)^{-1}$ no nula con la que es posible multiplicar ambos miembros de (10):

$$\left(X^T X \right)^{-1} X^T Y = \left(X^T X \right)^{-1} X^T XB \quad \rightarrow \quad \left(X^T X \right)^{-1} X^T Y = IB = B \quad (11)$$

donde I es la matriz identidad. Ec. (11) permite calcular los coeficientes B que minimizan S a partir de la matriz de datos X .

DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO EVALUADO Y MÉTODO DE MEDICIÓN

El edificio está ubicado en una zona residencial de baja densidad poblacional de la ciudad de Tandil, a 6.8km del centro urbano. Tiene dos plantas de 1745m² cada una, un atrio central coronado con una lucarna vidriada cerrada de 25m² y una fachada frontal dotada mayormente de superficies vidriadas. Los cerramientos DVH abarcan 347m². La envolvente opaca se compone de muros de 0.3m de espesor compuestos de revoque fino y grueso, ladrillo hueco, azotado hidrófugo, plancha de poliestireno expandido y ladrillo visto, cubriendo 415m². El edificio es cercano al nivel A de confort higrotérmico y cumple con las normativas de construcción vigentes. La relación vidrio/opaco es del 50%, encontrándose dentro del rango implicado en el modelo de distribución por orientación según criterio bioclimático con 30% del área vidriada orientada al norte, 25% al este, 25% al oeste y 20% al sur.

Se instalaron seis sensores HOBO U12 en el atrio del edificio a 1m (planta baja), 4.6m (1m por encima del piso de planta alta) y 6.6m (justo debajo de la lucarna) del piso en las proximidades de las paredes este y oeste, dos en cada nivel. Miden cada 10min la temperatura entre -20°C y 70°C con una precisión de ±0.35°C y resolución de 0.03°C a 25°C, humedad relativa (*HR*) entre 5% y 95% con una precisión de ±2.5% y resolución de 0.03%, e intensidad lumínica (*I_l*) entre 1 y 30000 lux. La densidad específica del vapor de agua en el aire *H* (g/m³) se calcula multiplicando la humedad relativa medida por la densidad de vapor saturado en aire a presión atmosférica. Esta última se obtiene por medio del ajuste empírico de datos medidos en el rango 0-40°C con la formula $H = (0.41628T^2 + 0.02171T + 1.90601)$, donde *T* es la temperatura en °C.

Los registros horarios de *T_e*, dirección e intensidad *u* del viento, humedad relativa, índice de nubosidad, presión atmosférica, visibilidad y precipitación son proporcionados por la estación meteorológica del *Servicio Meteorológico Nacional* localizada a 15km del edificio en un terreno con similares características. Otra estación meteorológica *Sinometer* WS1081 ubicada a 200m ofrece información complementaria cada 15min de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, dirección e intensidad del viento, intensidad de la radiación solar *I_r*, reflectividad en la banda roja, infrarrojo, NDVI, y humedad del suelo a 0.05m

Los sensores ubicados a igual altura registraron valores de temperatura muy cercanos por lo que estos se promedian para trabajar con un único valor de *T_i* por nivel, disminuyendo la incerteza de las mediciones. Si bien el edificio se encuentra monitoreado desde hace varios años, aquí se muestran los resultados del análisis de datos recogidos durante el periodo estival comprendido entre 13/12/2013 y 13/02/2014 a los fines de comparar los resultados con los reportados por Muñoz et al. (2014). Durante la mayor parte de este tiempo, el edificio permaneció cerrado y los acondicionadores de aire apagados. En consecuencia, la contribución de las fuentes internas de calor al intercambio con el exterior es mínima. Por otro lado, se observó que no existe una variación notoria entre los registros diurnos y nocturnos implicando que la reducción de temperatura debido a la irradiación nocturna puede despreciarse en este caso.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los coeficientes de la Ec. (5), y sus respectivas desviaciones estándar, para ambas plantas, calculados con el modelo RLM. El coeficiente de determinación (*Adjusted R²*) del proceso de ajuste estadístico es de 0.62 tanto para planta baja como alta. Por su parte, los valores de *a*, *b*, *c*, *d* y *f* reflejan la importancia relativa de los procesos físicos sobre la variación de la temperatura interna. La contribución debida a la radiación solar surge como la más significativa, seguida por la conducción, la convección debida al viento y, finalmente, la diferencia de la humedad específica. Este ordenamiento de los procesos presentes, del mayor al de menor importancia, se denominará “orden 1” y ya fue establecido en la Ec. (4).

La Figura 2 ilustra el proceso secuencial presentado por Muñoz et al. (2014) mientras los respectivos coeficientes se presentan en la sexta columna de la Tabla 1. Se observa que los valores obtenidos secuencialmente son muy próximos a los hallados con el modelo RLM mostrados en la quinta columna, por lo que ambas metodologías de cálculo parecen aparentemente equivalentes. Sin

embargo, si se cambia el orden de la secuencia de las regresiones lineales, cambian los valores de los coeficientes como se infiere de la Figura 3 donde se muestran las rectas que mejor ajustan los puntos experimentales si se elige ΔT como primera variable (orden "2" de la secuencia). Los gráficos de las Fig. 2 y 3 son similares; sin embargo, los coeficientes cambian en forma apreciable si se elige I_r ó ΔT como primera variable. También cambia significativamente el valor del coeficiente de determinación estadística R^2 que es un indicador de la correlación entre la variable dependiente respecto de la(s) independiente(s) en el rango 0–1 (no correlación y correlación perfecta, respectivamente).

Proceso	Coef.	Variable	Planta	RLM	Método secuencial con el orden 1	R^2	Método secuencial con el orden 2	R^2
Radiación	a	I_r	Baja	0.566±0.017	0.587±0.012	0.618	0.313±0.014	0.252
			Alta	1.025±0.024	0.850±0.019	0.579	0.322±0.014	0.266
Conducción	b	(T_e-T_i)	Baja	0.106±0.067	0.026±0.014	0.002	0.470±0.019	0.306
			Alta	-0.138±0.099	-0.175±0.023	0.038	0.504±0.034	0.133
Convección	c	u	Baja	0.087±0.021	0.077±0.020	0.010	0.185±0.023	0.042
			Alta	0.238±0.032	0.199±0.031	0.028	0.186±0.023	0.043
Ventilación	d	(H_e-H_i)	Baja	-0.022±0.035	0.008±0.007	0.000	-0.093±0.008	0.091
			Alta	-0.062±0.053	0.027±0.012	0.003	-0.101±0.009	0.088
Generación interna	f	---	Baja	0.164±0.011	-0.173±0.023		-0.066±0.027	
			Alta	-0.431±0.018	-0.329±0.038		-0.047±0.035	

Tabla 1: Coeficientes de la Ec. (5) hallados con el modelo de regresión lineal múltiple y regresión lineal aplicada en forma secuencial con dos órdenes diferentes de las variables.

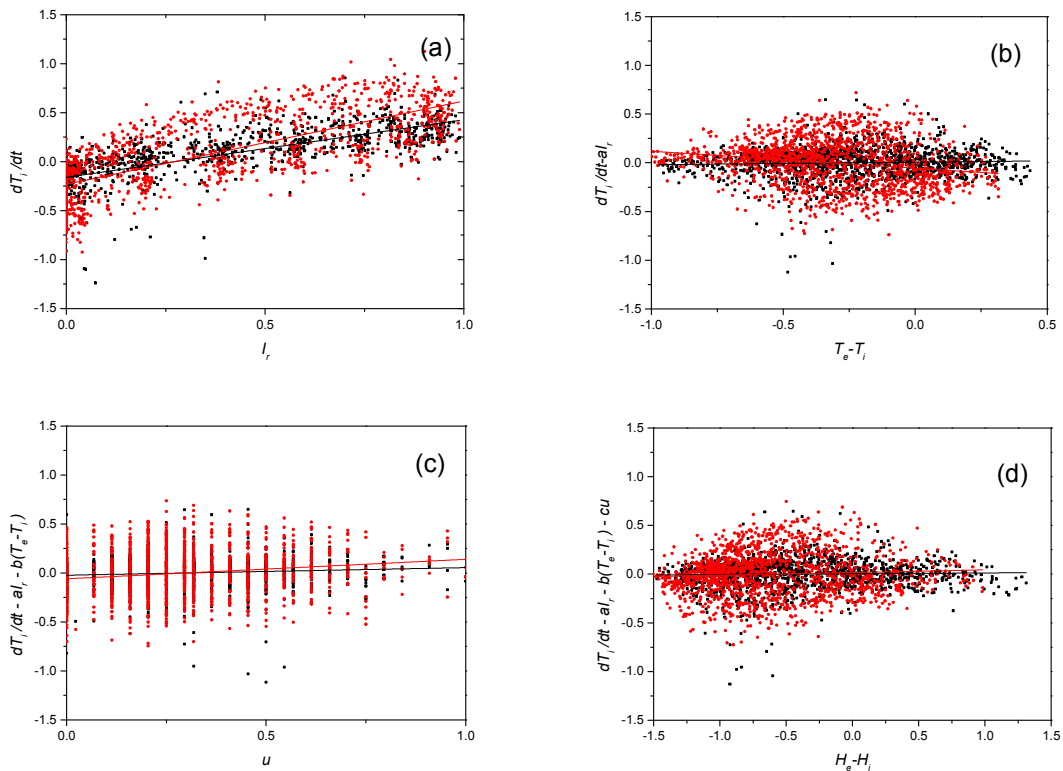


Figura 2. Correlación secuencial de la variación de la temperatura interior con: a) la radiación solar, b) la diferencia ΔT , c) la intensidad u , y d) la diferencia de humedad específica externa e interna. Rectas de mejor ajuste para los 60 días del verano de 2013–4 encontradas por el método de ajuste secuencial. Los símbolos negros corresponden a la planta baja y los rojos a la planta alta.

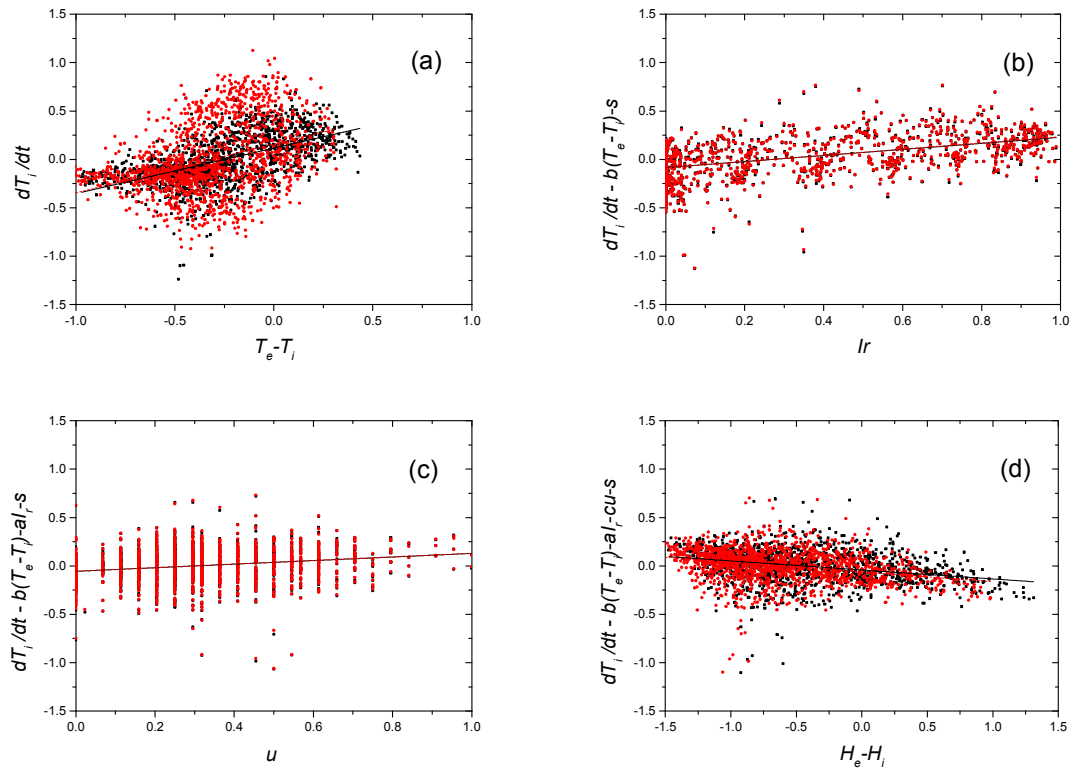


Figura 3. Idem Fig. 2 con una secuencia de correlación diferente: a) diferencia ΔT , b) radiación solar, c) intensidad u , y d) diferencia de humedad específica externa e interna.

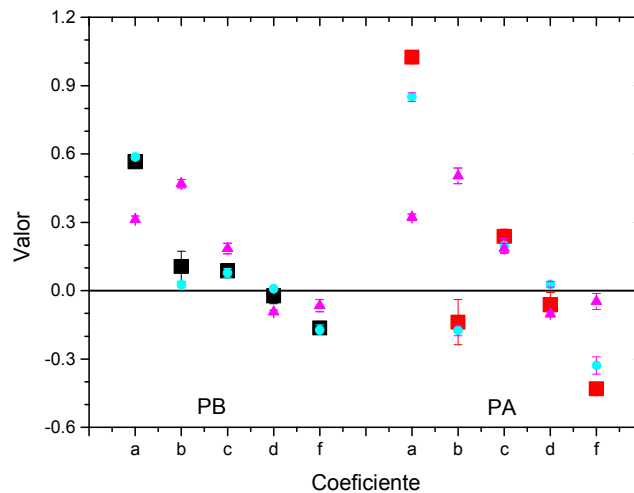


Figura 4. Coeficientes calculados con el modelo RLM (cuadrados negros y rojos), y por el método secuencial con el orden 1 (círculos celestes) y 2 (triángulos magentas).

La Figura 4 permite comparar gráficamente los coeficientes hallados en las diferentes formas. Se observa que los valores encontrados en forma secuencial con el orden 1 son similares a los obtenidos con el modelo RLM, mientras que con el orden 2 se presentan mayores discrepancias. Otra forma de comparar las metodologías de ajuste es mediante el residuo e_j dado por Ec. (5) como ilustra la Figura 5. Puesto que los gráficos de la izquierda, correspondientes al ajuste con el modelo RLM, resultan muy similares a los de la derecha, correspondientes al ajuste en forma secuencial, la representación del residuo no parece adecuada para distinguir la confiabilidad del método.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran ser dependientes del orden de la secuencia en la cual se hacen las regresiones lineales. Esto implica que los procesos físicos asociados a cada variable están relacionados entre sí, de modo que lo más conveniente es determinar todos los coeficientes en forma simultánea. El modelo RLM permite realizar fácilmente esta determinación, lográndose una rápida caracterización térmica del edificio en condiciones reales de uso a partir de mediciones de la temperatura interior y datos de estaciones meteorológicas cercanas.

La alta variabilidad de la derivada temporal de la temperatura interior agrega una dificultad adicional que se refleja en el coeficiente de determinación estadística R^2 . El mayor valor ($R^2 = 0.62$) se obtiene con el modelo RLM; es decir, éste es el método con el que se consigue la mayor correlación posible. Si el ajuste se hace en forma secuencial con un orden de importancia decreciente (orden de secuencia 1), el ajuste lineal con la primera variable independiente tiene un R^2 similar (0.62 y 0.58 para las plantas baja y alta, respectivamente), pero con el resto de las variables los R^2 son muy pequeños (< 0.04). A pesar de ello, todos los coeficientes de la Ec. (5) hallados de esta forma son muy similares a los encontrados con el modelo RLM (Fig. 4).

Los coeficientes son significativamente diferentes de los obtenidos con el modelo RLM si se utiliza un ajuste secuencial en otro orden. También, los R^2 de todos los ajustes lineales de la secuencia son menores que la mitad (< 0.31) del valor correspondiente al modelo RLM, confirmando que existe una baja correlación con este orden 2 elegido. El coeficiente de determinación estadística $R^2 = 0.62$ explica el 62% de la varianza de los datos. Este valor es aceptable teniendo en cuenta la variabilidad que representa trabajar con una derivada y datos meteorológicos debido a sus variaciones durante el día. Además, las desviaciones estándar encontradas son pequeñas frente a los respectivos coeficientes.

En consecuencia, el modelo RLM posibilita determinar la importancia relativa de los diferentes procesos físicos en la variación de la temperatura interior. La radiación solar da cuenta de más del 50% de la variación de temperatura, seguida por la conducción del calor a través de la envolvente y la convección debida al viento (15% cada una, aproximadamente). Comparando los coeficientes correspondientes a las plantas alta y baja, se observa que la radiación solar es captada en mayor medida por la planta alta. La conducción del calor tiene un efecto inverso en ambas plantas, esto es, en planta alta se pierde y en planta baja se gana calor, probablemente por la mayor temperatura del aire en la planta alta con respecto a la temperatura de la planta baja. El viento también produce un mayor efecto en T_i de planta alta que en aquella de la planta baja. La diferencia de la humedad específica entre el aire exterior e interior es de mucha menor importancia, lo cual sugiere una escasa ventilación natural. Esto concuerda con la baja proporción del área cubierta por las aberturas con respecto al área total de la envolvente, y con el sobrecalentamiento que presenta el edificio en verano.

CONCLUSIONES

Se analizaron los resultados del monitoreo térmico realizado durante 60 días consecutivos del verano 2013-2014 en un edificio cuyo tipo de construcción es representativo del centro bonaerense. Este periodo presenta una menor influencia del factor humano (asistencia de usuarios y personal administrativo, uso de acondicionadores de aire, etc.) sobre la gestión del edificio, y el mayor desafío para evaluar el confort de las instalaciones. Se calcularon las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior para condiciones reales de funcionamiento, distinguiendo el comportamiento por plantas. Algunos de los cálculos presentados son similares a los realizados para evaluar térmicamente las edificaciones con métodos convencionales. Sin embargo, el análisis efectuado es más confiable debido a que el resultado (i.e., la evolución de la temperatura interior) relaciona matemáticamente, y en forma simultánea, todas las variables relevantes disponibles (i.e., los datos registrados por las estaciones meteorológicas y las mediciones *in-situ*) en el marco de la resolución de un problema inverso. El valor relativo de los coeficientes, por otra parte, indica la importancia individual de los procesos de intercambio de calor. La metodología empleada no substituye la resolución del problema directo establecido por las normas IRAM que debe efectuarse de todos modos por ser de cumplimiento obligatorio en varias provincias argentinas y recomendado en

Regresión Lineal Múltiple

Método secuencial
con el orden 2

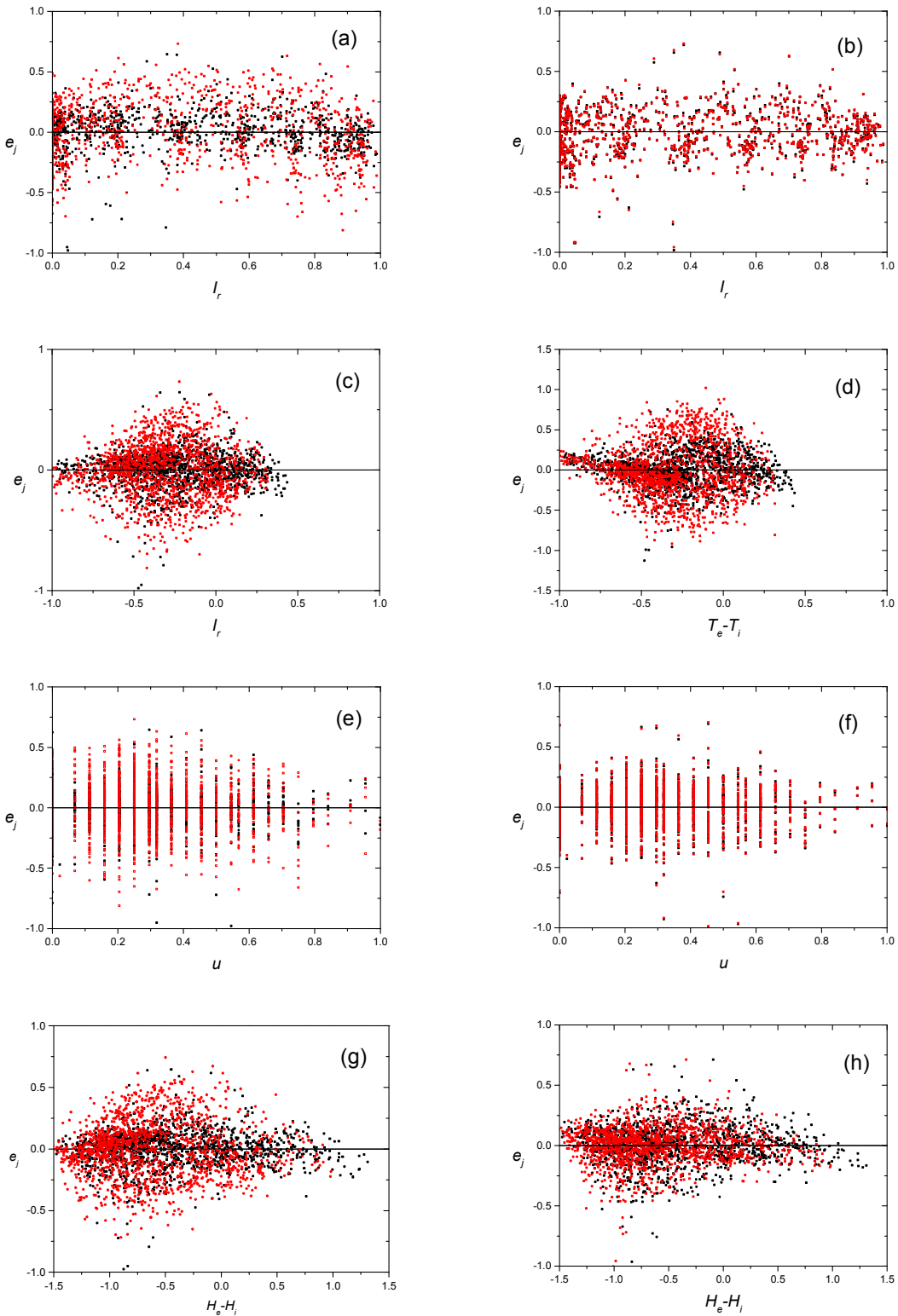


Figura 5. Residuos de los procesos de ajuste con RLM (izquierda) y en forma secuencial (derecha) representados en función de: (a, b) la intensidad de la radiación, (c, d) la diferencia de temperatura entre el interior y exterior, (e, f) la velocidad del viento y, (g, h) la diferencia de humedad específica del aire.

las restantes. Sin embargo, el procedimiento propuesto resulta útil cuando se quiere evaluar el comportamiento térmico de edificaciones ya construidas disponiendo de pocos datos. Además, la caracterización térmica de un edificio en condiciones reales de uso realizada con el modelo de RLM es un procedimiento sencillo y rápido.

Se encontró que el efecto de la humedad específica interna y externa no mejora la correlación entre las variables involucradas, lo cual sugiere una escasa ventilación. Por otra parte, las condiciones térmicas del interior reflejan que el ambiente se encuentra fuera de la zona de confort durante el periodo estival analizado y para alcanzarlo se requeriría de una importante ventilación natural por diferencia de temperatura y/o cruzada para evitar recurrir a equipos mecánicos que implicarían un elevado consumo energético (probablemente inviable) debido al espacio en cuestión.

El modelo analítico propuesto aporta información física cuantitativa para trabajar sobre la gestión de las aberturas y la ventilación natural, y para realizar comparaciones. Por otra parte, la variabilidad de los coeficientes ante la consideración de órdenes diferentes en la secuencia de los procesos de transferencia indica que estos están acoplados de alguna forma. En tal caso, el proceso de ajuste podría mejorarse empleado un modelo no lineal entre la variación de temperatura interior y las variables del entorno. Este aspecto será considerado en un futuro trabajo.

REFERENCIAS

- ASHRAE (2001). ASHRAE Handbook–Fundamentals. Nonresidential cooling and heating load calculation procedures. Cap. 29. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, EEUU.
- Berthou T., Stabat P., Salvazet R. y Marchio D. (2014). Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings. *Energy and Buildings* 74, 91-100.
- Bohlin T. P. (2006). Practical grey-box process identification: theory and applications. Springer, Londres, RU.
- Boutet M.L., Hernández A.L. y Jacobo G.J. (2013). Propuesta de optimización del comportamiento higrotérmico-luminico de un edificio escolar de la región N.E.A. a partir de monitoreo y simulación en periodo de otoño. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 17, 05.01-10.
- Braun J.E. y Chaturvedi N. (2002). An inverse gray-box model for transient building load prediction. *HVAC&R Research* 8, 1, 73-99.
- CIBSE (2015). Guide A: Environmental design. Chartered Institution of Building Services Engineers, Gran Bretaña.
- Davies M.G. (2004). Building Heat Transfer, John Wiley & Sons, Chichester, RU.
- Di Bernardo A., Filippín C. y Pipa D. (2011). Desempeño térmico-energético de un prototipo demostrativo de vivienda de interés social en Córdoba, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 08.35-42.
- Garzón B. y Mendonca C. (2012). Monitoreo y simulación térmica de dos viviendas sociales unifamiliares bajo condiciones reales de uso en la localidad de Colalao del Valle, Tucumán. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16, 05.39-44.
- Iordache V. y Iordache F. (2006) Energy performance of the building. Factors analysis. *Buletinul Stiintific XLIX*, N° 2, 66–75.
- IRAM 11601 (2002). Aislamiento térmico de edificios Métodos de cálculo Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- Muñoz N., Marino B.M. y Thomas L.P. (2014) Caracterización térmica de un edificio del centro bonaerense mediante mediciones y modelado analítico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 18, 05.19–28.
- Muñoz N. Marino B.M. y Thomas L.P. (2016). Calculo del flujo de calor a través de la envolvente edilicia y las resistencias superficiales usando mediciones termograficas y la temperatura sol-aire. Enviado a ASADES 2016.

- O'Neill P.J., Crawley D.B. y Schliesing J.S. (1991). Using regression equations to determine the relative importance of inputs to energy simulation tools, in: Proceedings of the Building Simulation '91 Conference, pp. 283–289, Sophia-Antipolis, Nice, France.
- Raftery P., Lee K.H., Webster T. y Bauman F. (2012). Performance analysis of an integrated UFAD and radiant hydronic slab system. *Applied Energy* 90, 250–257.
- Salvetti M.B., Czajkowski J. y Gómez A. (2010). Ahorro de Energía en Refrigeración de Edificios para Oficinas. Propuesta de indicadores de Eficiencia y Valores Admisibles. *Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente* 14, 07.17-24.
- Sander D.M., Cornick S., Newsham G.R. y Crawley D.B. (1993). Developing a simple model to predict heating/cooling energy based on building envelope thermal characteristics, in: Proceedings of the Building Simulation '93 Conference, pp. 223–230. A.E. Delsante, J.W. Mitchell y R.C. Van de Perre Editores. IBPSA Adelaide, Australia
- Suárez H. (2012). Invernadero con acondicionamiento térmico solar: Modelación con SIMUSOL. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16, 08.167-172.
- Tarantola A. (2005). Inverse problem theory and methods for model parameter estimation, SIAM.
- Tian Z. y Love J.A. (2009). Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements. *Energy and Buildings* 41, 320–330.
- Tiberiu C., Vlad I. y Caracaleanu B. (2013). Multiple Regression model for fast prediction of the heating energy demand. *Energy and Buildings* 57, 302-312.
- Whiten B. (2013). Model completion and validation using inversion of grey box models. *ANZIAM Journal* 54, 187-199.

ABSTRACT

A methodology for assessing the thermal behaviour of a typical building of Buenos Aires Province is introduced. It consists of the resolution of the “inverse problem” through the application of the multiple linear regression model to obtain the global thermal parameters values of the building from internal temperature and humidity measurements, and external meteorological parameters. Previously, the same problem was solved in a sequential way to estimate the internal temperature variation generated by the conductivity of the building envelope, the solar radiation and the convection due to wind. It is shown that the order of the sequence changes the results. In contrast, the multiple linear regression model allows us to correlate all the variables simultaneously. The relative importance of every heat transfer process is determined by means of the relative value of the correlation coefficients.

Keywords: thermal assessment of buildings, inverse grey box model, multiple linear regression, heat transfer processes.