

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UN EDIFICIO DEL CENTRO BONAERENSE MEDIANTE MEDICIONES Y MODELADO ANALÍTICO.

N. Muñoz Vázquez¹, 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 – Pinto 399, 7000 Tandil

Tel. 0249-4439660/1 Int. 115/122 – e-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

Recibido 15/08/14, aceptado 27/09/14

RESUMEN: Se presenta el análisis de mediciones continuas y sistemáticas de temperatura y humedad en puntos específicos del interior y las variables meteorológicas externas de un edificio público ubicado en la periferia de la ciudad de Tandil (Buenos Aires) cuya construcción es representativa de los estándares edilicios locales. La información obtenida es asociada mediante un modelo analítico que da cuenta de las contribuciones de la conductividad, radiación y convección debida al viento en la consideración de las propiedades térmicas del edificio. A partir de ellas, es posible estimar los coeficientes de la ecuación diferencial resultante que permite obtener la evolución de la temperatura interna para diferentes condiciones. El procedimiento es sencillo de realizar y da resultados útiles que pueden emplearse para corroborar la viabilidad de los materiales empleados en la construcción y el funcionamiento térmico del conjunto.

Palabras clave: evaluación térmica, modelo analítico, transferencia de calor, condiciones reales de uso.

INTRODUCCIÓN

La relevancia de la caracterización del comportamiento térmico de los espacios habitables encuentra sus fundamentos, entre otros, en su notable incidencia en el consumo energético a partir del incremento en los avances tecnológicos para lograr el confort interior. Al respecto, los requerimientos energéticos para refrigeración en el sector residencial corresponden al rubro de mayor importancia de energía demandada en verano. Para propiciar una disminución apreciable de este consumo sin afectar la calidad de vida de los ocupantes, los edificios deben adecuarse a las características climáticas locales e incluir los correctos diseño y gestión de la ventilación natural. Los beneficios directos e indirectos que implica el diseño de edificios en cuanto a su eficaz funcionamiento térmico dependen de la forma, la orientación y el propósito de su uso.

A pesar del destacado progreso tecnológico en la búsqueda de materiales y estrategias de climatización, y avances sustanciales en simulación, la tendencia creciente de la construcción de viviendas y de la compra de equipos de aire acondicionado, entre otros aspectos, generan preocupación en la comunidad científica alentando al análisis del comportamiento térmico-energético, de las condiciones de confort y de la conducta del usuario. Afortunadamente, en Argentina existen muchos, aunque todavía no suficientes, antecedentes de estudios de esta naturaleza. Como ejemplo, entre los más recientes pueden citarse los trabajos de Balter et al. (2011) quienes además del comportamiento térmico analizaron el consumo energético de departamentos ubicados a diferentes alturas (bajo y sobre la copa de los árboles) en edificios que presentan materializaciones y tecnologías de envolventes acordes a la situación climática árida de la ciudad de Mendoza en verano. Salvetti et al. (2013) estudiaron el comportamiento energético ambiental de torres de vivienda y oficinas en La Plata (Buenos Aires), con clima templado a cálido húmedo, para construir un indicador de consumo de energía real y mejorarlo a fin de utilizarlo en un modelo de consumo a nivel urbano. Filippín y Flores Larsen (2011) evaluaron el comportamiento térmico de verano de 4 viviendas másicas y compactas ubicadas en zonas urbanas de baja densidad en la ciudad de Santa Rosa (La Pampa) obteniendo estrategias de mejoramiento de las condiciones de confort con ahorro de energía. Por su parte, Di Bernardo et al. (2011) presentaron los resultados de la valoración térmico-energética estival de una vivienda social en Villa Allende (Córdoba), en clima templado cálido seco y propusieron estrategias de confort contemplando los hábitos de uso de sus ocupantes.

Puesto que en un edificio los procesos de transmisión del calor por conducción, convección y radiación y la acumulación de energía en el interior y en las paredes ocurren simultáneamente, es difícil discernir con exactitud la contribución de cada mecanismo en la transferencia calórica. 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. Junto con la radiación, los flujos convectivos de calor dependen de si el movimiento del aire es impulsado por el viento o por diferencias de densidad. En la transmisión de calor por conducción, debe considerarse que la envolvente se constituye por superficies construidas generalmente por capas de diferentes materiales con propiedades físicas distintas, y en algunos casos existen puentes térmicos. En el caso de la

¹ Becaria ANPCyT

² Profesor Asociado DE UNCPBA, Investigador Independiente CONICET

conducción, también se pueden generar transitoriamente sumideros y fuentes de calor por pérdida o acumulación debido a la variación temporal de las temperaturas en cada punto del interior. Otro factor que suma dificultad es el comportamiento térmico de los cerramientos de los edificios, el cual resulta muy complejo de evaluar en la práctica. Como consecuencia, el comportamiento higro-térmico de un edificio suele determinarse empleando códigos de simulación (*Simusol*, *Simedif*, *Ecotect*, *Energy Plus*, etc.) basados en modelos que dan cuenta de los principales fenómenos físicos, a partir de los cuales es posible reproducir la evolución temporal de la temperatura interna para diferentes condiciones del exterior (Flores Larsen et al., 2008; Tian y Love, 2009; Di Bernardo et al., 2011; Suarez, 2012; Garzón y Mendonca, 2012; Raftery et al., 2012; Boutet et al., 2013).

Un aspecto crítico del cálculo lo constituye la determinación de los valores de los parámetros físicos presentes en las ecuaciones y que se hallan en forma independiente por medio de experimentos o formulaciones teóricas para cada tipo de pared y de abertura, para luego ser integrados en los parámetros propios de los diferentes recintos y/o en parámetros globales de la edificación entera. Las normas IRAM permiten obtener valores típicos de tales parámetros para los materiales usados en las construcciones y establecen la forma de cálculo para los diferentes procesos de transmisión del calor. Este procedimiento se conoce en general como “problema directo” y es ampliamente empleado cuando se disponen, o se pueden estimar, los valores de los parámetros en las ecuaciones. Si estos valores no son conocidos, o se presentan pérdidas, o aparecen otros factores difíciles de cuantificar, los errores de los resultados pueden ser importantes. Una forma de resolver este inconveniente es simular numéricamente el problema y ajustar empíricamente los valores de los parámetros para reproducir los resultados de las mediciones, aunque muchas veces es posible obtener un mismo resultado cambiando varios parámetros.

Una forma alternativa consiste en resolver el “problema inverso” en el que los valores de los parámetros del modelo deben obtenerse a partir de los resultados o consecuencias. Los problemas inversos aparecen frecuentemente en matemáticas, ciencias e ingeniería, y cuentan con una base matemática sólida para su resolución de acuerdo a la dificultad del problema (Tarantola, 2005). Esta forma de solución aplicada a la caracterización térmica de las construcciones es empleada en este trabajo para un caso de estudio. El objetivo es hallar los parámetros globales de una edificación, que conduzcan a su caracterización, midiendo la temperatura en su interior y empleando los registros del exterior proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) o alguna estación meteorológica cercana. El procedimiento es aplicado a la evaluación del comportamiento térmico durante el verano de la Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) situada en la zona suburbana de la ciudad de Tandil (Buenos Aires) con el propósito de minimizar el costo de la climatización interna. Este estudio complementa el reportado por Thomas et al. (2014), quienes analizan el problema directo y calculan la resistencia térmica de la envolvente considerando los elementos de la construcción de acuerdo a las normas IRAM y mediciones termográficas.

CASO DE ESTUDIO

La ciudad de Tandil (37°19'Sur - 59°08'Oeste), cabecera del partido homónimo, se localiza en el centro-este de la provincia de Buenos Aires a 360km de la ciudad de Buenos Aires y 160km de la costa atlántica. Está emplazada en el sistema serrano de Tandilia y se encuentra a 175m snm, en la región geográfica de la pampa húmeda. El clima de la zona es templado y húmedo con veranos suaves (subhúmedo serrano en razón de la geomorfología circundante). Durante las noches y madrugadas de invierno suelen producirse heladas y bancos de niebla. El clima local además sufre la influencia de diversos fenómenos meteorológicos durante todo el año como el pampero, la sudestada y el arribo frecuente de frentes fríos desde el sur y cálidos desde el norte, que pueden dar origen a cambios importantes y rápidos de las condiciones meteorológicas con variaciones apreciables de los valores medios de la temperatura y humedad del aire que se mantienen durante varios días. Así, es frecuente que el clima estival alterne días agobiantes de calor con otros de mañanas frías, y también es usual la existencia de varios días cálidos consecutivos en invierno.

En esta zona el crecimiento sostenido de la población aumenta la demanda de viviendas que es cubierta parcialmente por emprendimientos privados de diversa envergadura. La aprobación del Plan de Ordenamiento Territorial en diciembre de 2007 marcó un punto de inflexión en el uso de la tierra actualizando las zonas definidas de acuerdo a los destinatarios y actividades. No obstante, la municipalidad exige el cumplimiento de pautas generales como el factor de ocupación del suelo (FOS), el factor de ocupación total (FOT), retiros de la línea municipal, etc., pero ninguna asociada con la sustentabilidad energética o el mantenimiento del ambiente. Predominan las construcciones modernas tradicionales que requieren de un alto costo para mantener calefaccionados los interiores en invierno y el uso intensivo de equipos de aire acondicionado en verano. Estudios previos indicaron que es posible lograr el refrescamiento natural en las noches estivales por medio de la ventilación nocturna optimizada por diferencia de temperatura, junto con muy buenos aislamiento e inercia térmica de la construcción, además de una adecuada gestión de las aberturas (Marino y Thomas, 2008).

Dentro de las actividades del Proyecto más amplio de análisis térmico-energético de construcciones típicas locales, varios edificios y viviendas fueron seleccionados para su monitoreo. En este trabajo se presentan los resultados preliminares obtenidos en el edificio inaugurado en noviembre de 2013 de la Biblioteca Central de la UNCPBA, en el Campus ubicado en una zona residencial de baja densidad poblacional a 6.8km del centro urbano. El edificio de dos plantas de 1200m² cada una mostrado en la Fig. 1 presenta un atrio central (sala de lectura) rematado por una lucarna vidriada cerrada de 25m² y una fachada dotada mayormente de superficies vidriadas. Los cerramientos de doble vidriado hermético con cámara de aire de 0.006m de espesor (transmitancia térmica $K = 2.80\text{W/m}^2\text{K}$) abarcan un área de 310m², mientras que las puertas y los paneles fijos, vidriados con cámara de aire de 0.012m ($K = 3.20\text{W/m}^2\text{K}$), ocupan 37m². El resto de la fachada se compone de muros de 0.300m de espesor compuestos de revoque fino y grueso, ladrillo hueco, plancha de poliestireno expandido y ladrillo visto de 0.120, 0.037 0.120m de espesor respectivamente, cubriendo un área total de 415m². El valor de K obtenido con el procedimiento descrito en la norma IRAM 11601 es cercano al nivel de confort higrotérmico A referido en la norma IRAM

11605 y de acuerdo a la Ley 13059 y al Decreto 1030. También se verificó que K cumple con lo especificado en la norma IRAM 11659-2 de ahorro de energía de refrigeración en verano. El porcentaje de área vidriada se encuentra dentro del rango propuesto en la Norma IRAM 11659-2 basado en un modelo de distribución de los vidriados por orientación según criterio bioclimático (IRAM 11603), con una relación vidrio/opaco del 50% distribuida de la siguiente forma: 30% del área vidriada se ubica al norte, 25% al este, 25% al oeste y 20% al sur. Otros detalles de la construcción, clima local y verificación de las normas son reportados por Thomas et al. (2014).

El edificio cuenta con 16 sistemas de calefactores de 25000 y 34000kcal/h de potencia, ubicados en los exteriores de las alas este y oeste, 8 en planta alta y 8 en planta baja. Equipos de aire acondicionado se hallan sólo en las oficinas que se encuentran aisladas del volumen principal analizado. Para el periodo considerado en este trabajo, el edificio estaba cerrado, los calefactores y aire acondicionados apagados mientras el personal administrativo y usuarios se encontraban de vacaciones. Por lo tanto, las fuentes internas de calor pueden ser despreciadas.



Figura 1: Vistas de (a) la fachada y (b) el atrio central en el interior del edificio de la Biblioteca Central de la UNCPBA.

METODOLOGÍA

Se instalaron seis sensores *HOBO* U12 en el interior del edificio en las posiciones mostradas en la Fig. 2. Estos miden cada 10min la temperatura entre -20°C y 70°C con una precisión de $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ y resolución de 0.03°C a 25°C , humedad relativa (HR) entre 5% y 95% con una precisión de $\pm 2.5\%$ y resolución de 0.03%, e intensidad luminica (I_l) entre 1 y 3000 lumens/pie². Los sensores se encuentran a 1m (planta baja), 4.6m (1m por encima del piso de planta alta) y 6.6m (justo debajo de la lucarna) del suelo en el atrio central en las proximidades de las paredes este(verde) y oeste (azul), dos en cada nivel. Los registros horarios de la temperatura del exterior (T_e), dirección y velocidad del viento (u), humedad relativa, índice de nubosidad, presión atmosférica, visibilidad y precipitación empleados en los cálculos son los proporcionados por la estación meteorológica del *Servicio Meteorológico Nacional* (SMN) localizada en terrenos de la VI Brigada Aérea de la *Fuerza Aérea Argentina* en Tandil. Los valores de estos parámetros son cotejados con los de la estación meteorológica *Sinometer* WS1081 del *Instituto de Hidrología de Llanuras* (IHLLA) ubicada en el Campus a 200m de la Biblioteca Central, encontrándose que no hay diferencias significativas entre ellos. Esta última mide cada 15min la temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, dirección y velocidad del viento, intensidad de la radiación solar (I_r), reflectividad en la banda roja, infrarrojo, NDVI, y humedad del suelo a 0.05m, ofreciendo información complementaria.

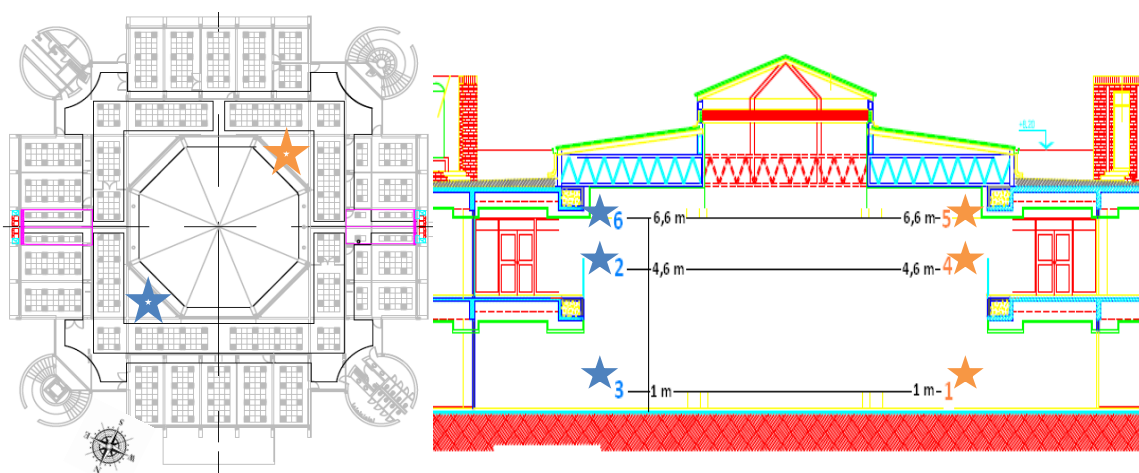


Figura 2: Vista de planta y corte del edificio. Los símbolos ★ muestran la ubicación de los sensores *HOBO*.

Se analizaron los datos de 60 días comprendidos entre el 15 de diciembre de 2013 y el 12 de febrero de 2014. Durante este periodo estival, las variaciones de las condiciones climáticas fueron suaves permitiendo obtener luego parámetros globales cuyos valores pueden cotejarse considerando, por separado, características específicas del diseño. A partir del 13 de febrero, surgieron algunos días frescos en los que la calefacción fue encendida y las condiciones internas cambiaron, por lo que los registros posteriores a esta fecha no fueron considerados en el presente análisis. Puesto que los sensores ubicados a un mismo nivel de altura registran valores de temperatura muy cercanos, estos se promedian para trabajar con un valor de la temperatura interna T_i por nivel, disminuyendo la incerteza de las mediciones. La Fig. 3a muestra la evolución temporal de T_i en los niveles de planta baja (PB) y planta alta (PA), y T_e permitiendo observar que las notorias variaciones externas no se reflejan en el interior. En particular, entre el 1 y 4 de enero y entre el 22 y 26 de enero se registraron bajas pronunciadas de la temperatura externa que tardó en manifestarse internamente (T_i disminuyó lentamente), lo cual sugiere una buena aislación de la envolvente. Por otra parte, una ampliación de las curvas como la ilustrada en la Fig. 3b muestra que prácticamente no hay desfase entre T_e y T_i indicando que la envolvente no presenta inercia térmica apreciable.

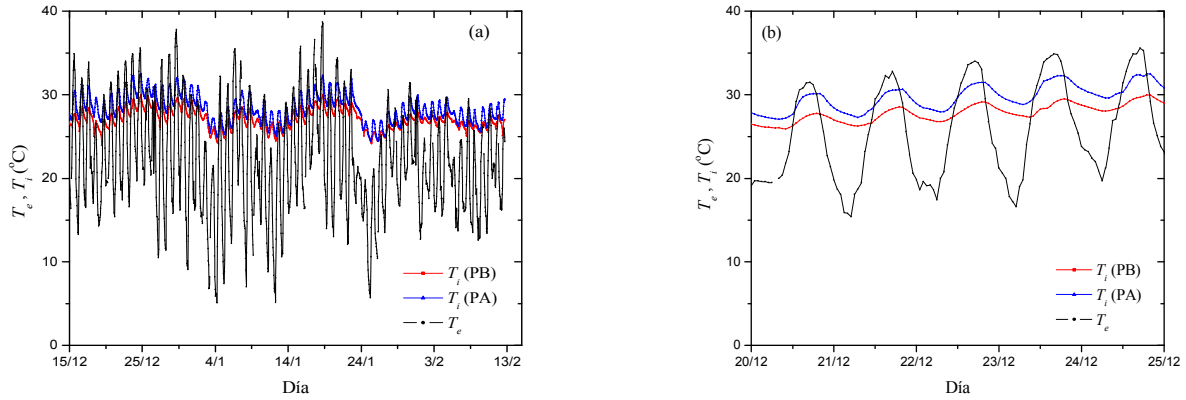


Figura 3: (a) Evolución de las temperaturas externas e internas durante 60 días del verano 2013-2014. (b) Detalle de la evolución de las temperaturas.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A fin de obtener las características térmicas de la edificación bajo estudio, se emplean las ecuaciones básicas corrientemente usadas tanto en estimaciones teóricas como en códigos de simulación. El edificio se considera como un espacio que contiene aire y elementos a temperatura uniforme T_i que varía con el tiempo. En el exterior, la temperatura ambiente T_e también varía con el tiempo. Como $T_e \neq T_i$, en general, se produce un intercambio de calor por conducción a través de la envolvente a la que se considera compuesta de las paredes y las aberturas cerradas. Si el espesor de ésta es mucho menor que la dimensión característica del edificio, el flujo de calor dentro de las paredes puede suponerse unidimensional y perpendicular a sus superficies. Por su parte, para cada superficie de la envolvente, la Ley de Fourier indica proporcionalidad entre el flujo de calor estacionario y el gradiente de temperatura, siendo la conductividad térmica del material el coeficiente que vincula ambas variables. Dado que la envolvente se compone de distintos tipos de cerramientos (muros, ventanas, puertas, etc.), se emplea la transmitancia térmica K que incluye las resistencias térmicas superficiales que dependen de las capas límite de aire solidarias a las superficies externa e interna.

Otro factor a considerar es la inercia térmica en las paredes que produce una amortiguación de los cambios externos de temperatura y un retardo entre los máximos de temperatura externa e interna (Davis, 1984). La Fig. 3b muestra que dicho retardo es despreciable en el edificio analizado, por lo que se puede asumir que los efectos relacionados con la inercia térmica de la envolvente en su conjunto (y la amortiguación del calor interno) no son significativos. Esto se debe, fundamentalmente, a la alta proporción de paneles vidriados que tienen inercia térmica despreciable (Thomas et al., 2014).

Cuando las temperaturas interna y externa 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 $q > 0$ cuando el calor se transfiere hacia el interior, se tiene que

$$q(t) = K[T_e(t) - T_i(t)] \quad (1)$$

El calor ingresado se distribuye aumentando T_i . La relación entre $q(t)$ y el aumento de temperatura es

$$q = mC_p \frac{dT_i}{dt}, \quad (2)$$

donde m es la masa total térmicamente vinculada dentro del recinto (es decir, del aire y los objetos interiores), y C_p es su calor específico promedio. Igualando (1) y (2) se obtiene la siguiente ecuación diferencial simple

$$\tau \frac{dT_i}{dt} = T_e(t) - T_i(t) \quad (3)$$

$$\text{con} \quad \tau = \frac{mC_p}{K}. \quad (4)$$

Notar que no importan los valores de cada uno de los parámetros por separado sino la relación entre la inercia térmica global del edificio y la transmitancia térmica media de su envolvente. Por otra parte, la incerteza de τ es la suma de las incertezas de los valores de cada componente de (4). El significado de τ es el de un tiempo característico de respuesta de la edificación frente a variaciones de la temperatura externa. Por ejemplo, si $T_e - T_i = \Delta T = \text{const}$, la solución de (4) es $T_i = T_i(t=0) + \Delta T e^{-t/\tau}$ y τ representa el tiempo necesario para que la temperatura interna cambie en un factor $\Delta T/e$. Esta propiedad de las paredes es reconocida y empleada desde hace tiempo en modelos térmicos dinámicos de una habitación o de edificaciones sencillas (Davis, 2004a). Así, hay diferentes formas de estimar este tiempo por medio de series de Fourier, funciones de autocorrelación, transformadas, etc. (Urbikain y Davies, 2008). Aquí se emplea un método sencillo de cálculo en forma similar al empleado por Davis (2004b), aunque no hora por hora sino empleando la totalidad de los datos (juntos) de 60 días para disminuir los errores de las mediciones y, consistentemente, el de los coeficientes resultantes.

Por otra parte, la radiación solar ingresa a través de las superficies vidriadas y es retenida en el interior por efecto invernadero o bien indirectamente porque eleva la temperatura de las fachadas y cubiertas no vidriadas incrementando el flujo de calor por conducción en una magnitud superior a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior considerada anteriormente. La ecuación para calcular los flujos de calor a través de cerramientos soleados requiere, como datos de partida, la radiación neta incidente, el ángulo de incidencia y el coeficiente de absorción de la radiación solar de la superficie externa expuesta, entre otros (Duffie y Beckman, 1991).

El viento aumenta la disipación de la energía en la envolvente (al afectar la capa límite superficial) y la renovación del aire a través de las aberturas o por infiltración en las rendijas de puertas y ventanas. Estos efectos dependen del tipo de superficie, el área expuesta, el ángulo entre el edificio y la dirección del viento, las características aerodinámicas y obstáculos eólicos cercanos, la diferencia de temperatura entre el exterior e interior, 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 e interior (Volantino y Cornejo Siles, 2007).

Dada 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 de la radiación incidente (Wm^{-2}) y a la intensidad del viento v (ms^{-1}) (De Paul, 2006). Sumando, además, posibles fuentes internas de calor, la ecuación (3) se transforma en

$$\frac{dT_i}{dt} = a(T_e - T_i) + bI_r + c_1u + d \quad (5)$$

$$\text{o} \quad \frac{dT_i}{dt} = a(T_e - T_i) + bI_r + c_2u(T_e - T_i) + d \quad (6)$$

donde $a = 1/\tau$ (s^{-1}), b ($\text{m}^2\text{°C s}^{-1}\text{W}^{-1}$) se relaciona con la captación solar media del edificio, c_1 (°C m^{-1}) y c_2 (m^{-1}) se relacionan con el efecto convectivo del viento y de las infiltraciones, y d (°C s^{-1}) con la generación interna promedio. La ecuación (6) solo difiere de (5) en el término de la acción del viento en cuyo caso el calor disipado o entregado por el viento también depende de la diferencia de temperatura entre el edificio y el aire (Díaz y Barreneche, 2005). Los coeficientes a , b , c , d no dependen de la diferencia de temperatura $T_e - T_i$, de la radiación ni de la velocidad del viento, pero si obedecen a otros efectos tales como la inclinación del sol a mediodía, características aerodinámicas, etc. En el cálculo aquí propuesto estas dependencias son despreciadas, pero ellas deben ser tomadas en consideración en estudios de más largo plazo, o bien cuando se desea obtener un detallado comportamiento térmico de la edificación evaluada.

Otro fenómeno a considerar es el de la irradiación nocturna. Esta se produce como consecuencia de que el aire de la atmósfera es parcialmente transparente a la radiación infrarroja cuando la humedad ambiente es baja y el cielo está despejado, permitiendo que las superficies puedan emitir flujos de energía hacia el firmamento que no son compensados desde la atmósfera, y que pueden causar el enfriamiento nocturno. En ese caso, se debería producir una disminución adicional de temperatura durante las noches.

RESULTADOS

En primer lugar se procede al cálculo de los coeficientes a , b , c , d de las Ecs. (5) o (6) para la planta baja del edificio. La Fig. 4 ilustra la dependencia del cambio temporal de la temperatura interna con la diferencia de temperaturas entre el exterior y la temperatura interior de PB. Se infiere que la combinación de variables elegidas conduce a una relación lineal en acuerdo con (4), aunque presenta una importante dispersión debido a otros efectos no contemplados en esa ecuación. La recta de mejor ajuste permite encontrar $\tau \approx 1/0.75 = 1.34$ y $d \approx 3.2$. Se observa también que no existe una diferencia notoria entre los registros diurnos y nocturnos implicando que la reducción de temperatura debido a la irradiación nocturna puede despreciarse en este caso.

Para simplificar el análisis, se define la función auxiliar

$$f_1 = \frac{dT_i}{dt} - a(T_e - T_i) - d \quad (7)$$

y representa en función de I_r en la Fig. 5 considerando sus valores en periodos de 20 días (identificados con colores diferentes). Como no se aprecian diferencias entre los resultados obtenidos en estos lapsos temporales, se infiere que la

radiación y la captación solar del edificio fueron similares, en concordancia con los datos de las estaciones meteorológicas. De la recta de mejor ajuste se determina que $b = 0.0025$.

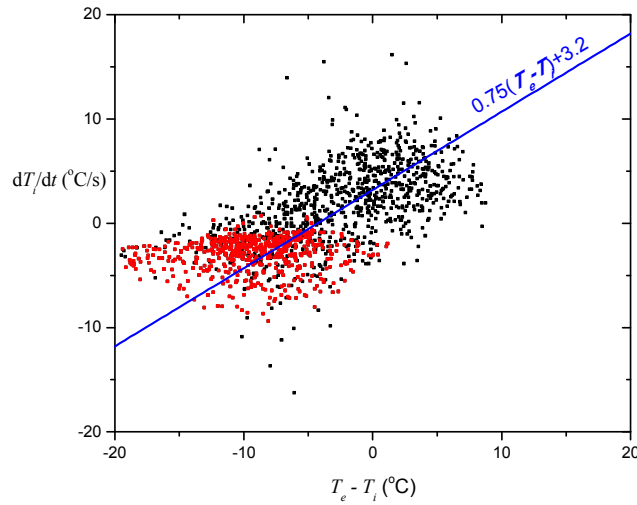


Figura 4: Derivada de la temperatura interior en función de la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior para las medidas diurnas (cuadrados negros) y nocturnas (triángulos rojos). La recta azul es la de mejor ajuste.

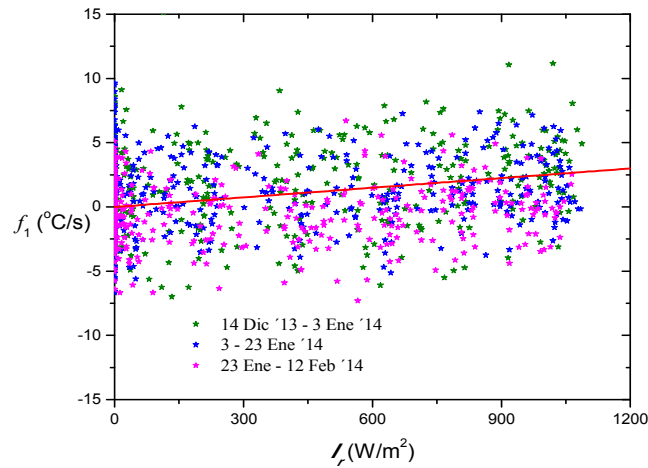


Figura 5: Variación de la función auxiliar f_1 con la intensidad de la radiación solar. La recta de mejor ajuste es $0.0025I_r$.

Análogamente, definiendo otra función auxiliar

$$f_2 = \frac{dT_i}{dt} - a(T_e - T_i) - bI_r - d \quad (8)$$

y representándola gráficamente en función de la velocidad del viento (Figs. 6 y 7), nuevamente se obtiene una relación lineal en acuerdo con las ecuaciones (5) o (6). En ambos casos, la ordenada al origen no es nula; las rectas de igual pendiente que pasan por el origen se representan en líneas de trazos. Comparando el ajuste y la dispersión observados en las Figs. 6 y 7, se deduce que la dependencia es ligeramente mejor con $u(T_e - T_i)$, aunque algún factor adicional deba introducirse para que la ordenada al origen sea nula y la dispersión de los puntos medidos resulte menor.

Para encontrar los coeficientes a , b , c , d de las Ecs. (5) o (6) para la planta alta del edificio se procede en forma análoga, encontrándose $a \approx 1.3$, $b \approx 0.0025$, $c_2 \approx -0.05$ y $d \approx 3$. Luego, comparando con los resultados de la PB, se encuentra que la planta alta presenta:

- + mayores pérdidas por conducción (73%), probablemente debido a la presencia de la lucarna vidriada en el techo,
- + la misma ganancia por radiación, lo cual es razonable en vista de la simetría de las superficies vidriadas de PA y PB,
- + mayores pérdidas por convección (i.e., la PA está más expuesta a la acción del viento), y
- + mayor efecto de las fuentes internas puesto que el aire cálido tiende a acumularse en la parte superior independientemente del lugar donde se genera.

Hallados los coeficientes, se integra (6) con la condición inicial $T_i(t=0) = \text{valor medido el primer día del periodo analizado}$. En la Fig. 8 se aprecia que la estimación de $T_i(t)$ realizada de esta manera concuerda con las medidas tanto en PB como en

PA, sin error acumulativo apreciable luego de 60 días. Por lo tanto, la ecuación (6) y los coeficientes hallados dan cuenta de las características térmicas medias del edificio analizado.

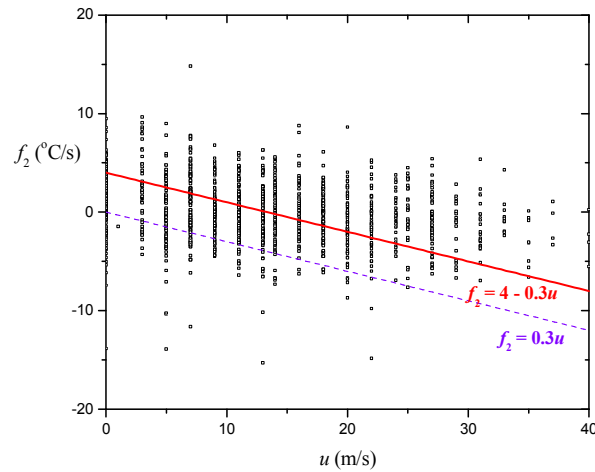


Figura 6: Variación de la función auxiliar f_2 con la intensidad del viento. De las líneas de mejor ajuste resulta $c_1 = -0.3$.

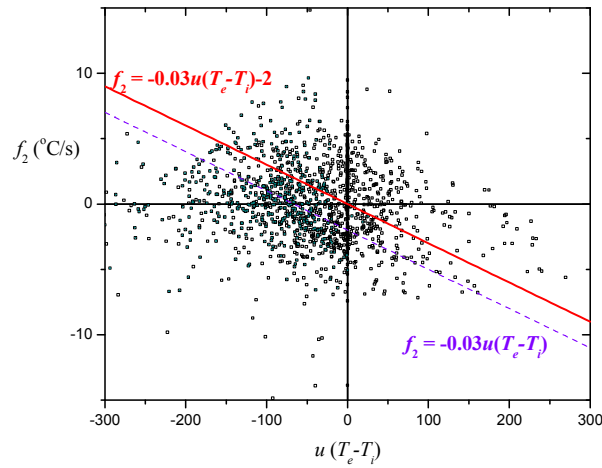


Figura 7: Variación de la función auxiliar f_2 con la intensidad del viento. De las líneas de mejor ajuste resulta $c_2 = -0.03$. (Los símbolos rellenos de color corresponden a los registros nocturnos.)

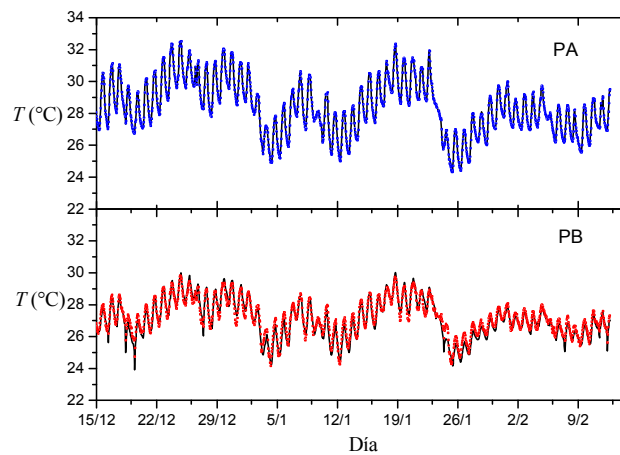


Figura 8: Comparación entre las temperatura internas reales (símbolos) y aquellas estimadas con la Ec. (6) (líneas) en ambas plantas del edificio.

Las contribuciones de cada término de la Ec. (6) al intercambio total de calor con el exterior se muestran en la Tabla 1. Se halla que el 52-54% se debe a la conducción, 23-26% a los efectos convectivos del viento, 13-18% a fuentes internas y sólo

5-8% a la radiación solar. Este último resultado llama la atención, habida cuenta que el período estudiado es el de la máxima radiación solar anual (verano) y por la gran proporción de superficies vidriadas en la envolvente del edificio. No obstante, este resultado puede deberse a la existencia de parasoles que evitan la acción de la radiación solar directa a través de los cerramientos de vidrio en verano, y los materiales y pinturas usados en las paredes de concreto. Estos materiales aportan superficies selectivas frías porque tienen una baja absorbanza (~ 0.95) y por ende no se calientan demasiado con la radiación solar directa (de longitud de onda del visible e IR cercano), aunque presentan una alta emitancia (buenos irradiadores en longitudes de onda del IR lejano). El análisis de estos aspectos es reportado por Thomas et al. (2014).

Por otra parte, la desviación estándar es muy alta en todas las variables. Esto es razonable en vista del modelo simplificado empleado, el cálculo de una derivada y la distancia a las estaciones meteorológicas que proveen los parámetros externos. Un suavizado de las curvas disminuye la dispersión, pero se quiere mostrar aquí que ello no es necesario si el procesamiento para encontrar las rectas de mejor ajuste se realiza adecuadamente. Desde el punto de vista práctico, una gran dispersión implica que es necesario tener un número apreciable de datos para obtener valores precisos de los coeficientes. Sin embargo, los datos deben abarcar un número grande de días; un mayor número de mediciones por hora en pocos días sólo agrega mayor dispersión.

Se buscó además una correlación de las variaciones de T_i con otros parámetros medidos usualmente por las estaciones meteorológicas, en particular, con la nubosidad, la humedad relativa ambiente y la dirección del viento. Ninguno de estos parece afectar la respuesta térmica del edificio estudiado. La nubosidad probablemente no tenga influencia debido a sus altos valores registrados y a los reducidos calentamiento por radiación solar y enfriamiento por irradiación nocturna, con respecto a los otros procesos involucrados analizados previamente, en coincidencia con la clasificación ambiental de la zona de acuerdo a norma IRAM 11603. Una correlación entre T_i y la diferencia de humedad entre el interior y exterior indicaría el cambio de contenido de vapor de agua por renovación del aire; la no conexión entre estas variables sugiere una escasa ventilación del edificio. Tanto la ventilación natural como la relación de los cambios de temperatura con la dirección del viento se profundizarán en un próximo trabajo puesto que las fluctuaciones importantes de estas variables podrían explicar parcialmente la dispersión resultante.

	Contribución	Promedio	Desviación estándar	Suma	Mediana	Máximo	Porcentaje (%)
PA	Conducción	9.00	6.03	12818	8.51	26.31	54
	Radiación	0.75	0.91	1087	0.21	2.72	5
	Viento	3.79	3.82	5399	2.89	21.75	23
	Fuentes internas	3	0	4347	3	3	18
PB	Conducción	4.75	3.26	6762	4.35	14.62	52
	Radiación	0.75	0.91	1087	0.21	2.72	8
	Viento	2.39	2.08	2965	1.85	11.87	26
	Fuentes internas	1.2	0	1739	1.2	1.2	13

Tabla 1: Estadística de los valores absolutos de cada término de la Ec. (6) en $^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ durante los 60 días analizados.

CONCLUSIONES

Se analizaron los resultados del monitoreo térmico durante 60 días del verano 2013-2014 en un edificio público situado en la periferia de la ciudad de Tandil del centro-este bonaerense, y con ellos se calcularon las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior, distinguiendo el comportamiento en las plantas baja y alta y para condiciones reales de funcionamiento. 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 detallado debido a que el resultado (i.e., la evolución de la temperatura interior) se relaciona matemáticamente con 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 problemas inversos. La metodología empleada no substituye la resolución del problema directo por medio de las normas IRAM, que de todos modos debe efectuarse ya que son de cumplimiento obligatorio en varias provincias y recomendado en el resto. Sin embargo, la metodología empleada puede resultar útil cuando se quiere estimar el comportamiento térmico de las edificaciones disponiendo de pocos datos.

El período elegido para el estudio es el que presenta una menor influencia del factor humano (asistencia de usuarios y personal administrativo, uso de acondicionadores de aire, etc.) en el manejo del edificio, y el mayor desafío para evaluar el confort de las instalaciones. A partir de los resultados obtenidos se evidencia una ligera estratificación vertical y uniformidad térmica horizontal en el gran atrio central, producto directo del diseño arquitectónico y materiales empleados en la construcción, que domina el micro-clima en otros espacios (mucho más reducidos) del edificio. Las condiciones térmicas naturales del interior reflejan que el ambiente se encuentra fuera de la zona de confort durante el período 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.

En general, una buena aislación térmica, poca captación de la energía solar y ventilación natural en verano propician una disminución apreciable del consumo de energía requerido para mantener el confort interior de las construcciones, mejorar la calidad de vida de los ocupantes y aumentar el rendimiento de los trabajadores, estudiantes, usuarios, etc. en ambientes cerrados. Por otra parte, el ahorro energético general implica una disminución del consumo de combustibles fósiles cada vez más costosos y de la liberación de los gases de efecto invernadero asociados. Dentro del marco que impone esta problemática

socio-ambiental, el presente trabajo se inserta en las primeras etapas de un proyecto más amplio que pretende mejorar el conocimiento y las estrategias necesarias para optimizar la construcción de edificaciones minimizando el consumo energético global destinado a la climatización de interiores en el centro bonaerense. Como un primer paso, se analiza el comportamiento térmico de un edificio típico en operación para el que, junto con la gestión habitual y en base a los resultados obtenidos, se espera hacer propuestas concretas a fin de mejorar las condiciones de confort. El modelo analítico propuesto aporta información física cuantitativa para trabajar sobre la gestión de las aberturas y la ventilación, los cambios en la aislación general, la distribución de los espacios, etc. y para realizar comparaciones. Se prevé continuar con el análisis del monitoreo extendiéndolo a todo el año y comparar los resultados de este análisis con los calculados a partir de las normas IRAM reportados por Thomas et al. (2014). También se prevé incorporar la utilización de software de simulaciones térmicas y el modelado físico de laboratorio a los efectos de comparar los comportamientos térmicos en diferentes instancias y sugerir soluciones prácticas.

AGRADECIMIENTOS

La investigación es financiada por medio del PICT 2202/12 de la ANPCyT y el PIP CONICET 054/10.

REFERENCIAS

- Balter J., Ganem C. y Cantón M.A. (2011). Evaluación térmica y consumos energéticos en verano de departamentos ubicados a distintas alturas en edificios mäsicos en la ciudad de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 05.83-91.
- Boutet M.L., Hernández A.L. y Jacobo G.J. (2013). Propuesta de optimización del comportamiento higrótérmico-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.
- Davies M.G. (1984). The heat storage/loss ratio for a building and its response time. *Applied Energy* 18, 179-238.
- Davies M.G. (2004a). *Building Heat Transfer*, 1^{ra} edición, pp. 8-15, Cap. 1. John Wiley & Sons, Chichester, RU.
- Davies M.G. (2004b). Wall thermal capacity and transfer coefficients. *Building and Environment* 39, 1, 109-112.
- De Paul I. (2006). Medidas del coeficiente H del viento sobre una vivienda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 10, 03.21-28.
- 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.
- Duffie J.A. y Beckman W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2^{da} edición, pp. 174-175, Cap.3. Wiley-Interscience, Nueva York, USA.
- Díaz V.S. y Barreneche R.O. (2005). *Acondicionamiento térmico de edificios*. 1^{ra} edición, pp.15-16, Cap. 1. Nobuko. Buenos Aires, Argentina.
- Filippín C. y Flores Larsen S. (2011). Comportamiento térmico de verano de viviendas unifamiliares compactas en condiciones reales de uso en clima templado en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14, 05.01-08.
- Flores Larsen S., Filippín C. y Flores L. (2008). Analysis and improvement of the thermal behavior of social houses in northern Argentina through transient thermal simulation. *The Open Construction and Building Technology Journal* 2, 217-223.
- 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.
- Salveti M.B., Czajkowski J. y Gómez A.F. (2013). Indicators of Energy Efficiency in Buildings. Comparison with Standards in Force in Argentina. *Open Journal of Energy Efficiency* 2, 163-170.
- Suárez H. (2012). Invernadero con acondicionamiento térmico solar: Modelación con SIMUSOL. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16, 08.167-172.
- Marino B.M. y Thomas L.P. (2008) Comportamiento térmico de una vivienda frente a variaciones importantes de temperatura en verano. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12, 05.25-32.
- 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.
- Urbikain M.K. y Davies M.G. (2008). One-dimensional solutions to Fourier's equation and measures of heat transmission through walls: The role of wall decay times. *Building and Environment* 43, 9, 1433-1445.
- Tarantola A. (2005). *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*, SIAM, Filadelfia, EE.UU.
- 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.
- Thomas L.P., Marino B.M. y Muñoz Vásquez N. (2014). Cuantificación de las resistencias térmicas superficiales y pérdidas de calor por conducción en edificios aplicando termografía. XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, 28-31 Octubre, Oberá, Misiones, Argentina.
- Volantino V.L. y Cornejo Siles E.J. (2007). Ahorro energético inherente a infiltraciones de aire por correcciones en el diseño de carpinterías utilizadas en viviendas de interés social. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 08.51-57.

ABSTRACT

The analysis of continuous and systematic measurements of temperature and humidity in specific sites within a public building and the external meteorological parameters is presented. The edifice, built with the local standards, is located in the suburbs of Tandil City (Buenos Aires, Argentina). The information collected is integrated by means of an analytical model that considers the contributions of the conductivity, radiation and convection caused by the wind in the consideration of the thermal properties of the building. From them, it is possible to estimate the coefficients of the resulting differential equation that allows us to obtain the internal temperature evolution under different conditions. The procedure is simple and gives useful results that can be used to corroborate the viability of the materials employed in the construction and the thermal operation of the whole.

Keywords: thermal evaluation, analytical model, heat transfer, actual use conditions.