

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN EDIFICIO COMPLEJO DEL CENTRO BONAERENSE A PARTIR DE SIMULACIONES CON ENERGYPLUS

B. M. Marino, N. Muñoz y L. P. Thomas

Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro Provincia de Buenos Aires (CIFICEN), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires – Pinto 399, 7000 Tandil
e-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

Recibido: 05-08-19; Aceptado: 04-11-19; Publicado en línea: 09-12-19.

RESUMEN.- Debido a los altos costos de producción y consumo de la energía, la caracterización del comportamiento higro-térmico de los espacios habitables pre-existentes es una de las tareas más importantes para alentar el ahorro y mejorar la eficiencia energética de los mismos. Para realizarla, suelen emplearse programas de simulación que permiten analizar situaciones que son difíciles o costosas de estudiar de otra manera. Aquí se presentan los resultados del balance térmico global, y de las componentes de la envolvente, de un edificio público complejo construido bajo estándares en el centro bonaerense obtenidos usando el programa *EnergyPlus* para diferentes situaciones externas y en condiciones reales de uso. Se evalúan las dificultades para mantener el confort en verano e invierno, y se consideran los posibles cambios a la envolvente para mejorar la aislación y la ventilación natural.

Palabras claves: edificios complejos, balance térmico, eficiencia energética, *EnergyPlus*, condiciones reales de uso.

ANALYSIS OF THE THERMAL BEHAVIOUR OF A COMPLEX BUILDING LOCATED IN THE CENTRE OF BUENOS AIRES PROVINCE (ARGENTINA) FROM SIMULATIONS USING ENERGYPLUS

ABSTRACT.- As a result of the high costs of energy production and consumption, the characterization of the hygro-thermal behaviour of pre-existing habitable spaces is one of the most important tasks to encourage energy saving and improve energy efficiency of buildings. For doing that, simulation programmes are often used, which provide information that is difficult and/or costly to obtain otherwise. The present study introduces the results of the global thermal balance of a public complex construction built under standards of Buenos Aires Province, found using the programme *EnergyPlus* for different external situations and under actual use conditions. The thermal balance of the building envelope components is also considered. Difficulties in maintaining the comfort in summer and winter are assessed, and the possible changes in the building envelope to improve thermal insulation and optimize natural ventilation are analyzed.

Keywords: complex buildings, thermal balance, energy efficiency, *EnergyPlus*, actual use conditions.

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de las orientaciones, asoleamiento, parasoles, ventilación natural, materiales aislantes y envolventes verdes son factores asociados con la sustentabilidad del hábitat que contribuyen a mejorar la calidad de vida, la salud humana y del edificio, la eficiencia energética y los costos de construcción. Si bien el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) impulsa la aplicación de reglas que no son de carácter obligatorio pero sientan las bases para la oficialización de las mismas, ningún código de edificación establece criterios claros sobre sustentabilidad. No obstante, existen aproximaciones como, por ejemplo, la Ley 13059 y el Decreto 1030/2010 de la provincia de Buenos Aires que establecen las condiciones de

acondicionamiento térmico en la construcción de edificios para mejorar calidad de vida de los ocupantes y disminuir el impacto ambiental mediante el uso racional de la energía. En general, las normas establecen los valores globales de los parámetros que caracterizan a los materiales usados en las edificaciones y la forma estandarizada de calcular el intercambio de calor a través de los muros bajo los diferentes procesos de transmisión para las distintas zonas bioclimáticas. La eficiencia de la aislación determina la categoría de la edificación entre los niveles A y H según la norma IRAM 11900.

La caracterización térmica de un edificio se basa en la evaluación del intercambio energético a través de la envolvente edilicia, integrando los aportes de las diversas componentes de la misma (e.g. muros, aberturas, techos, etc.).

Para ello es necesario discernir como contribuye cada proceso de transmisión del calor (e.g. conducción, convección, radiación) y determinar la cantidad de energía acumulada en el interior del edificio y en las paredes. En particular, el estudio de la conducción térmica a través de paredes es profuso y conduce al desarrollo de herramientas que posibilitan continuos y notorios avances en la gestión energética de los edificios. Puesto que los cálculos asociados corresponden, en general, a condiciones climáticas promedio, los valores resultantes de los parámetros edilicios resultan adecuados para aplicar durante la etapa de diseño de la construcción, pudiendo cambiar luego para cada caso debido a las características intrínsecas del espacio habitable, la variedad de materiales, el envejecimiento, las características geográficas, etc.

La transferencia dinámica de calor a través de la envolvente depende de su capacidad calorífica global o “masa térmica”. La energía almacenada en la envolvente edilicia puede cuantificarse, pero la energía real acumulada o liberada en todo el edificio es más difícil de calcular porque involucra la masa térmica interior y su distribución, las fuentes térmicas internas, la ganancia solar y las condiciones reales de uso del edificio, que pueden variar con el tiempo. Si los valores de todos los parámetros edilicios involucrados son conocidos, entonces el comportamiento térmico de una construcción puede determinarse resolviendo las ecuaciones diferenciales y/o integrales que rigen los procesos de transferencia de calor con las condiciones de contorno adecuadas (i.e., la evolución de las condiciones meteorológicas en el exterior). Como consecuencia de la complejidad involucrada en los cálculos, el comportamiento higrotérmico de un edificio suele determinarse empleando códigos de simulación basados en modelos que dan cuenta de los principales fenómenos físicos presentes, lo cual constituye un progreso respecto de los cálculos simplificados sugeridos por las normas.

Existe una gran variedad de programas aplicados a la simulación energética y/o al análisis térmico de edificaciones. Sus usos son muy variados e incluyen el cálculo de cargas térmicas y emisión de CO₂, la evaluación de las condiciones para el confort térmico, la estimación de los consumos de energía, el análisis de diferentes estrategias de control de los sistemas de climatización, la evolución de temperatura o humedad relativa en las diferentes zonas del edificio, etc. En Argentina, desde el 2000 a la fecha, se han desarrollado programas de simulación energética en edificios tales como CEEMAKMP, CEEMACON y CEEMAQT (Gonzalo, 1998; Nota et al., 2003) que resuelven la ecuación de calor en estado estacionario, y ARQUITROP Y SETI (Chauvie, 2004) basados en el método de la admitancia. No obstante, las herramientas computacionales más utilizadas son los programas SIMEDIF (Flores Larsen y Lesino, 2001) y SIMUSOL (Saravia y Alía, 2016), desarrollados en el Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (Salta, Argentina). SIMEDIF permite realizar la simulación térmica de edificios con acondicionamiento natural a través de sistemas solares pasivos. SIMUSOL es un programa que simula el funcionamiento transitorio de distintos sistemas físicos (térmicos, eléctricos, mecánicos, con aire húmedo o combinaciones de los mismos) y puede aplicarse tanto al estudio de edificios como de sistemas solares (e.g., calentadores de agua, cocinas, secadores, desalinizadores, equipos fotovoltaicos) y generadores térmicos de vapor y o electricidad. Debe tenerse presente que las predicciones de los programas más sencillos resultan satisfactorias cuando, en la comparación hora a hora, un 80% de las temperaturas

resultantes difieren en no más de 2°C de los valores monitoreados y el 95% de las mismas difieren en menos de 3°C (Chauvie, 2004).

La utilización de programas implica contar con la descripción digital detallada del edificio y con los valores de todos los parámetros edilicios involucrados. Dada la incerteza sobre los valores de los parámetros característicos de los materiales efectivamente empleados, se requieren validaciones específicas para definirlos. Si bien esta tarea conlleva un esfuerzo importante, los programas de simulación son herramientas ventajosas para determinar el balance térmico total del edificio o el parcial de cada componente de la envolvente, y también para analizar situaciones virtuales que son difíciles o costosas de estudiar de otra manera.

Con el fin de encontrar soluciones concretas y viables para reducir el consumo de energía en edificios públicos localizados en la zona centro de la Provincia de Buenos Aires, se calcula y analiza el flujo de calor intercambiado a través de la envolvente edilicia de un caso de estudio usando el programa *EnergyPlus* y las condiciones meteorológicas registradas durante el transcurso de un año. El edificio es el de la Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) situado en su Campus, en la zona sub-urbana de Tandil. Este es un caso complejo, dotado de una geometría peculiar y responde a un uso específico; su sistema constructivo, componentes y materialidad (muros, techos y aberturas) son los recomendados por las normas IRAM para la región geográfica de pertenencia. Los resultados numéricos se comparan con los obtenidos del monitoreo térmico del edificio.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del edificio evaluado.

Tandil se localiza en el centro-este de la provincia de Buenos Aires a 360 km de la ciudad de Buenos Aires, 160 km de la costa atlántica y 188 m sobre el nivel del mar. Emplazada en el sistema serrano de Tandilia en la región geográfica de la pampa húmeda, pertenece a la zona IV(c) de clima templado frío de transición (IRAM 11603, 2011), con veranos suaves (subhúmedo serrano en razón de la geomorfología circundante) y amplitudes térmicas intermedias ($\approx 15^\circ\text{C}$) a lo largo del año. Durante la noche y las madrugadas de invierno suelen producirse heladas y bancos de niebla. Debido a la alta nubosidad registrada, la región no cuenta con un recurso solar significativo en invierno y es afectada por diversos fenómenos meteorológicos durante todo el año (e.g., pampero, sudestadas, frentes fríos y cálidos) que pueden dar origen a cambios rápidos de las condiciones meteorológicas con variaciones apreciables de los valores medios de temperatura y humedad del aire que se mantienen durante varios días. Las recomendaciones locales de construcción involucran envolventes con muy buena aislación térmica, doble aislación en techos respecto de aquella en los muros, aprovechamiento de la inercia térmica para disminuir el efecto de la amplitud térmica, el control de infiltraciones, la implementación de la ventilación cruzada durante el verano y una relación superficie vidriada – superficie opaca que supere el 15%.

El edificio evaluado se ubica en una zona residencial de baja densidad poblacional. Tiene dos plantas de 1745 m² cada una, un atrio central rematado por una lucarna vidriada cerrada de 25 m² y una fachada frontal dotada mayormente de

superficies vidriadas. Los cerramientos de doble vidriado hermético (DVH) con cámara de aire de 0,006 m de espesor abarcan un área de 310 m² de la envolvente, mientras que las puertas y los paneles fijos vidriados con cámara de aire de 0,012 m ocupan 37 m²; todas las superficies vidriadas tienen ventiletes superiores que pueden abrirse parcialmente. El resto de la envolvente vertical se compone de muros de 0,30 m de espesor compuestos de revoque fino y grueso, ladrillo hueco, azotado hidrófugo, planchas de poliestireno expandido de 0,035 m de espesor y ladrillo visto, cubriendo un área total de 415 m². Los valores de la conductividad térmica, densidad, espesor y calor específico de estos materiales empleados en el cálculo del flujo de calor son los recomendados por las normas IRAM 11603. De acuerdo al valor $U = 0,72 \text{ W/m}^2\text{°C}$ de la envolvente edilicia total obtenido con el procedimiento descrito en la norma IRAM 11601 sin considerar las resistencias superficiales, la categoría del edificio es cercana al nivel A de confort higrotérmico y también cumpliría con la norma IRAM 11605 relacionada con el ahorro energético por refrigeración en verano. La relación vidrio/opaco es del 50% distribuida de la siguiente forma: 30% del área vidriada se ubica al norte (N), 25% al este (E), 25% al oeste (O) y 20% al sur (S). La misma se encuentra dentro del rango implicado en un modelo de distribución de los vidriados por orientación según criterio bioclimático. Por su parte, la relación superficie vidriada / piso (o área cubierta) es del 20%. La envolvente combina 7 componentes constructivos que se repiten: dos tipos de superficies de DVH de 0,024 m y 0,028 m de espesor, mampostería de muros dobles, techo compuesto, piso, lucarna que permite sólo el ingreso de la luz solar, y sector de calderas con puertas metálicas. El techo se compone de una losa de hormigón (0,10 m de espesor) con una capa de poliestireno expandido (0,051 m), contrapiso (0,026 m), carpeta (0,020 m) y geotextil (0,050 m) en la parte superior; en el interior, el cielorraso es de yeso (0,010 m) y se ubica a unos 0,20 m de la losa. Se encuentra que, en total, $U \approx 0,542 \text{ W/m}^2$ para el techo, sin considerar las resistencias superficiales. Imágenes, la vista de planta y el corte del edificio pueden encontrarse en el manuscrito de Muñoz (2019); los valores de los parámetros asociados con los materiales de la envolvente fueron reportados por Muñoz et al. (2015, Tabla 2 – Muro 1).

2.2. Mediciones.

Se instalaron seis sensores *HOBO* U12 en el interior del edificio a 1m (planta baja = PB), 4,6m (1m por encima del piso de planta alta = PA) y 6,6m (justo debajo de la lucarna) desde el suelo en el atrio central, dos en cada nivel (Muñoz, 2019). Cada sensor mide cada 10 min la temperatura interna T_i entre -20°C y 70°C con una precisión de $\pm 0,35^\circ\text{C}$ y resolución de $0,03^\circ\text{C}$ a 25°C , y humedad relativa (HR) entre 5% y 95% con una precisión de $\pm 2,5\%$ y resolución de $0,03\%$. Los registros horarios de temperatura externa T_e , humedad relativa del aire, presión, intensidad y dirección del viento, e irradiancia solar fueron proporcionados cada 15 min por una estación meteorológica *Sinometer* WS1081 ubicada en el Campus a 200m de la Biblioteca Central. Se analizaron los datos de un año comprendido entre el 20 de febrero de 2016 y el 19 de febrero de 2017. La irradiancia normal directa y la irradiancia normal difusa se determinan con el método de Liu-Jordan (1960) a partir de la irradiancia global medida.

2.3. Detalles de la simulación con *EnergyPlus*.

La simulación del intercambio de energía con el exterior y los efectos de las principales cargas térmicas del edificio de la Biblioteca Central se realizó con la versión 8.6 del programa

de código abierto *EnergyPlus* (Crawley et al., 2001; <https://energyplus.net/>). Funciona con los datos proporcionados por dos tipos de archivos principales: *.idf* y *.epw* relacionados con el diseño 3D del edificio y con los datos meteorológicos respectivamente. La disposición tridimensional del edificio y la generación inicial del archivo *.idf* se realizó con el programa *Design Builder* (<https://www.designbuilder.co.uk/>) que contempla, además, la definición inicial de los materiales empleados en la construcción y sus propiedades térmicas.

Introduciendo los parámetros correspondientes, *EnergyPlus* proporciona una solución integrada ya que la respuesta térmica del edificio se encuentra acoplada a los sistemas primarios y secundarios. Un sistema primario es el encargado de producir calor (calderas) o frío (equipo de aire acondicionado central) para ser suministrado a los sistemas terminales del sistema de climatización, mientras que un sistema secundario es aquel que aprovecha el fluido usado para calentar o refrigerar el aire. El programa permite definir intervalos de tiempo para la interacción entre el ambiente interior, las condiciones externas y los sistemas primario y secundario. Los datos de entrada deben ingresarse para el lapso de un año y entonces es posible realizar simulaciones anuales o para los intervalos de tiempo requeridos combinando los efectos de calefacción, aire acondicionado, ganancias internas, ventilación cruzada y natural, entre otras opciones. El programa realiza un cálculo simultáneo de los efectos radiativos y convectivos en las superficies interiores y exteriores. Además es posible establecer modelos de confort térmico con base en la actividad que se desarrolla en el edificio.

La figura 1 muestra diagramas de la representación digital del edificio en los que la baranda de la terraza, el porche de la puerta principal y la lucarna vidriada elevada por encima del nivel de la terraza (indicadas en color violeta) presentan características especiales que intervienen en la convección del aire que rodea el edificio y en la proyección de sombras. El edificio se describe mediante 621 superficies que conforman 19 zonas térmicas (oficinas, auditorios, salas de estudio, etc.) distribuidas en PB y PA. Una zona térmica es un “volumen” con características térmicas únicas que pueden llegar a afectar el comportamiento térmico global de la construcción. El atrio central se divide en dos zonas, una en PB y otra en PA conectadas por una superficie virtual –la abertura central– en forma de octógono (línea verde en la Fig. 1c) que permite el paso de aire sin restricciones. Dos de las cuatro estructuras cilíndricas de las esquinas contienen las escaleras y por tanto se encuentran comunicados con el interior mientras las otras dos, con depósitos y baños, están normalmente parcial o totalmente cerrados. El contorno circular de cada cilindro se aproxima con 40 superficies planas.

La energía ingresada por unidad de tiempo a cada zona térmica es igual a la suma de las cargas internas, la transferencia de calor por convección y conducción desde las diferentes superficies, la transferencia de calor debido al aire ingresado desde zonas aledañas, el calor suministrado por la infiltración de aire desde el exterior y la salida de los sistemas de calefacción/aire acondicionado. La fórmula usada por el código es:

$$C_{\zeta} \frac{dT_{\zeta}}{dt} = \sum_{k=1}^{N_q} \dot{Q}_{ik} + \sum_{k=1}^{N_s} h_{ik} A_k (T_{sk} - T_{\zeta}) + \sum_{k=1}^{N_{\zeta}} \dot{m}_{ik} C_{pa} (T_{\zeta k} - T_{\zeta}) + \dot{m}_e C_{pa} (T_e - T_{\zeta}) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

donde C_{ζ} y T_{ζ} son la capacidad calorífica y la temperatura en la zona ζ ; \dot{Q}_{ik} es el calor aportado por las N_q fuentes de calor internas en la zona ζ que incluye las ganancias internas de calor debidas a la radiación solar, los ocupantes, las luces, los equipos eléctricos y las eventuales fugas térmicas; h_i es el coeficiente de transferencia de calor interno; A_k es el área; T_{sk} es la temperatura de la superficie k de las N_s superficies que

envuelven la zona ζ ; \dot{m}_e es el flujo de aire (con capacidad calorífica C_{pa}) proveniente del exterior a temperatura T_e ; y \dot{m}_{ik} es el flujo de aire proveniente de las N_{ζ} zonas adyacentes a temperatura $T_{\zeta k}$; y \dot{Q}_{sys} es el calor entregado por el sistema de calefacción por aire o aire acondicionado en esa zona.

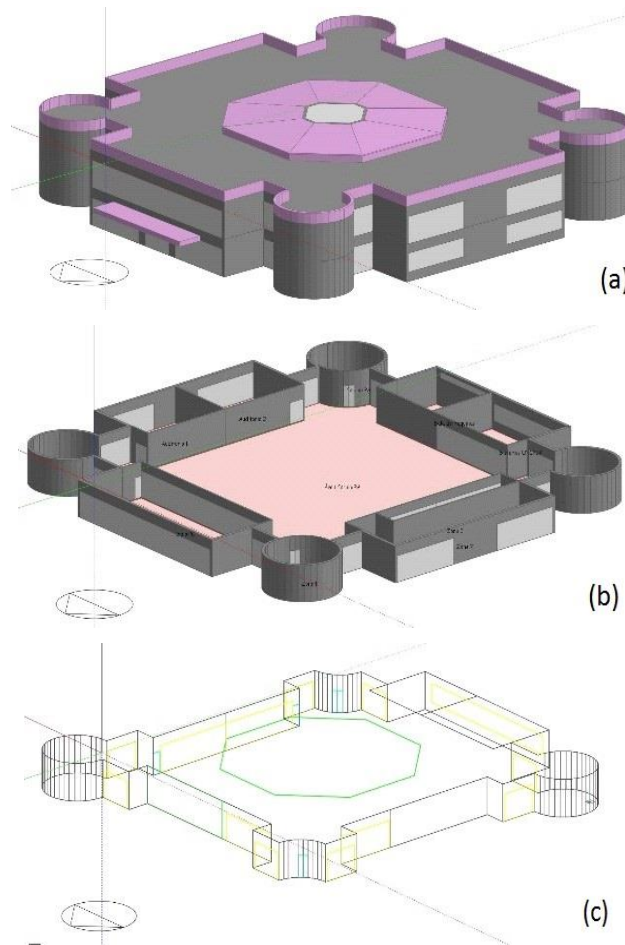


Fig. 1: Geometría del edificio evaluado: (a) Envoltente, (b) Interior de planta alta, (c) Interior de planta baja.

Cada término de Ec. (1) se calcula por separado. Por ejemplo, el ingreso de aire de densidad ρ_a a través de una abertura desde el exterior debido al viento es:

$$\dot{m}_e = \rho_a C_w A_w F_w v \quad (2)$$

Donde: $0 < F_w < 1$ es la porción abierta de una abertura de área A_w , C_w es el coeficiente de descarga y v es la velocidad del viento. La temperatura T_{sk} calculada por el programa se obtiene a partir del balance de calor en el interior de cada muro, techo, piso o DVH. La transferencia de calor no estacionaria entre el exterior y el interior se calcula por medio

de funciones que consideran la radiación solar de onda corta e IR y el intercambio convectivo en la capa límite de aire que rodea el muro. Los cálculos para el techo y piso también incluyen la transferencia de calor no estacionaria. Debido a la gran superficie cubierta del edificio, para el piso se adoptó el modelo de intercambio de calor entre el mismo y el interior y el valor de la temperatura de la tierra debajo del piso (18°C) predeterminados por el software; en general, para habitaciones o viviendas pequeñas se utilizan otros modelos más convenientes (Flores Larsen, 2011). En cuanto a las superficies vidriadas, el programa calcula T_{se} y T_{si} de cada vidrio considerando la transferencia de calor en el interior del DVH, la transmisión y reflexión de la radiación visible e IR

en las superficies y la absorción de energía en el material mediante cuatro ecuaciones acopladas.

El balance térmico en todas las zonas, muros, etc. se realiza iterativamente para alcanzar la solución que describa a todas las partes. Las características de todas y cada una de las partes de la envolvente, tabiques, DVH y aberturas interiores deben ser especificadas, constituyendo un gran desafío cuando se evalúan edificios complejos como el de la Biblioteca Central. El procedimiento se facilita recurriendo a valores estándar ingresados por defecto; aun así, deben corroborarse todos los valores a fin de que los resultados de la simulación sean correctamente asignados.

En general, el valor óptimo operativo de T_i para cualquier edificio es 26°C en verano y 20°C en invierno (ISO 13779). Esta temperatura se define como “el valor deseable promedio entre las temperaturas medias interna y radiante de todas las superficies internas”. Si bien *EnergyPlus* permite simular el balance térmico con los valores medios de los parámetros meteorológicos proporcionados por IRAM 11603, en el presente estudio se usan los valores de los parámetros meteorológicos registrados en forma horaria por la estación meteorológica cercana.

Las cargas térmicas de verano son distintas a las de invierno y en ambas estaciones hay periodos en los que es posible evitarlas. Por ejemplo, durante los periodos vacacionales, el edificio permanece cerrado y la ventilación es mínima, el número de personas en el interior y la disipación energética generada por la actividad metabólica de los mismos pueden despreciarse, como así también la carga térmica generada por la iluminación y los equipos eléctricos y electrónicos. Por lo tanto, la simulación del comportamiento térmico de la Biblioteca Central durante vacaciones y recesos resulta más sencilla con una notoria disminución de las incertezas de los parámetros utilizados. En caso contrario, la simulación que contempla la operación de los sistemas de calefacción, circulación forzada y aire acondicionado requiere definir lo mejor posible las cargas internas, introducir los parámetros que se correspondan con los equipos disponibles y programar los horarios de funcionamiento correspondientes de acuerdo con la ocupación horaria en los diferentes días de la semana.

3. RESULTADOS

3.1. Temperatura interna.

Dada la escasa diferencia entre T_i de PB y PA en el atrio, en la figura 2a se representa la temperatura promedio del interior a lo largo del año analizado. Durante el mes de enero, el edificio permanece cerrado o con muy poca ocupación y sin cargas térmicas significativas por lo que es razonable encontrar que T_i simulada (línea verde) y T_i medida (línea roja) evolucionan en forma parecida. También concuerdan los tiempos para los que se obtienen los valores máximos y mínimos diarios de T_i . Durante el estío es $T_i \approx 29^\circ\text{C}$ con máximos de 31°C, revelando el sobrecalentamiento del interior. En invierno, T_i simulada sin calefacción (línea verde) se mantiene en los valores máximos de T_e en forma similar a lo que ocurre en verano mientras el valor medido en el interior es 22–23°C (línea roja) debido a que la calefacción, al contrario de lo que ocurre con la simulación, está encendida. Para obtener valores simulados similares a los medidos (línea magenta en Fig. 2b), es necesario suministrar unos 450 kWh diarios de calefacción al atrio central. Esta cantidad de calor es sólo una parte del total que se requiere entregar al edificio

completo (atrio, oficinas, auditorios, salas de estudio, etc.) para mantener la temperatura a un nivel de confort.

3.2. Intercambio general de calor.

En la figura 3 se representa el calor intercambiado a través de la superficie exterior de la envolvente del edificio considerando las contribuciones de los procesos de conducción, radiación IR y convección a través de las diferentes componentes constructivas. Se simula la situación en la que el edificio se encuentra cerrado, los sistemas de aire acondicionado (verano) y calefacción (invierno) en el atrio permanecen apagados, y las fuentes adicionales de calor (iluminación, personas, equipos electrónicos, etc.) son desechadas. La Fig. 3a muestra que la amplitud del intercambio de calor es significativa en verano debido a la importante ganancia solar durante el día y disipada por la noche. La contribución más importante a este intercambio es la debida a los muros (línea roja), seguida por la de los vidrios. En invierno (Fig. 3b), la menor ganancia solar diurna, debida a la menor radiación solar, se compensa con calefacción generándose pérdidas igual de importantes durante la noche. Se observa que el intercambio de calor no es el mismo cada día, modificándose cuando la T_e cambia.

3.3 Intercambio de calor a través de las superficies opacas.

La figura 4 muestra el calor Q_c transmitido por conducción a través de los muros verticales planos y cilíndricos durante los primeros días de enero del periodo evaluado. Las curvas de Q_c resultan ser similares durante el invierno y se omiten por brevedad. Valores positivos (negativos) de Q_c indican ganancias (pérdidas), es decir, representan a flujos de calor entrantes (salientes) del edificio. En la Fig. 4a se observa que el calor ingresado a través de los muros orientados al NE (línea negra) es mayor por la mañana como era de esperar ya que ellos reciben la radiación solar directa matinal, mientras que a la tarde son los muros orientados al SO los que aportan mayor calor al interior pues reciben la radiación solar directa durante el ocaso. A través de los muros cilíndricos (Fig. 4b) ingresa una cantidad de calor transmitido por conducción ligeramente menor que la transmitida del mismo modo a través de los muros planos. Por la noche, prácticamente todo el calor ingresado a través de los muros durante el día es devuelto al ambiente exterior. Por construcción, la lucarna se encuentra cerrada herméticamente.

También se encuentra que la evolución de Q_c a través del techo es similar al de todos los muros verticales juntos e, incluso, la presencia de un enfriamiento radiativo similar. Esto se debe a que el área total de los muros verticales que componen la envolvente es similar al área de techo. Por otra parte, el intercambio de Q_c a través del piso es mucho menor y tiene una evolución diferente que el correspondiente al techo, ya que el piso no recibe aporte solar alguno. El calor intercambiado entre el edificio y el exterior a través del piso depende de la temperatura del piso del sector edificado cubierto y el suelo del parque que lo rodea, los cuales presentan un enfriamiento diferente al de los muros.

También es posible evaluar con *EnergyPlus* la transferencia del calor por convección a través de las superficies externas de la envolvente utilizando la fórmula $Q_{conv} = h_c(T_{se} - T_e)$ con $h_c = h_e$ (constante) proporcionado por norma IRAM. La figura 5 muestra los resultados obtenidos para los muros verticales planos y cilíndricos. Se observa que, en general, Q_{conv} es negativo, es decir, la convección disipa calor. No obstante, en algunos casos, al mediodía se distingue una transferencia de calor por convección hacia los muros.

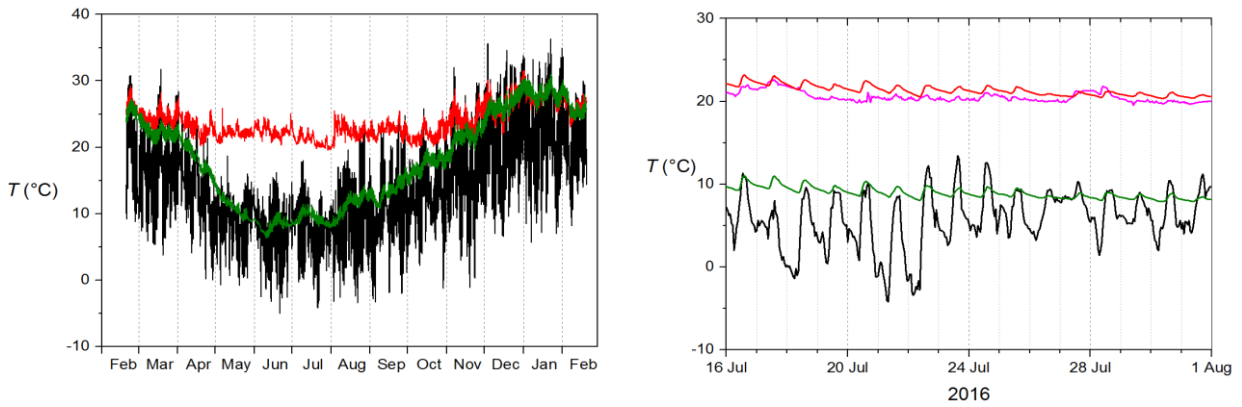


Fig. 2: (a) Evolución de la temperatura externa (línea negra), temperatura interna del atrio medida con el sistema de calefacción encendido en invierno (línea roja), temperatura interna del atrio que resulta de la simulación sin considerar calefacción ni cargas térmicas (línea verde) durante todo el año. (b) Idem pero incluyendo la temperatura interna que resulta de incluir el encendido de la calefacción en la simulación (línea magenta) durante el receso académico invernal 2016.

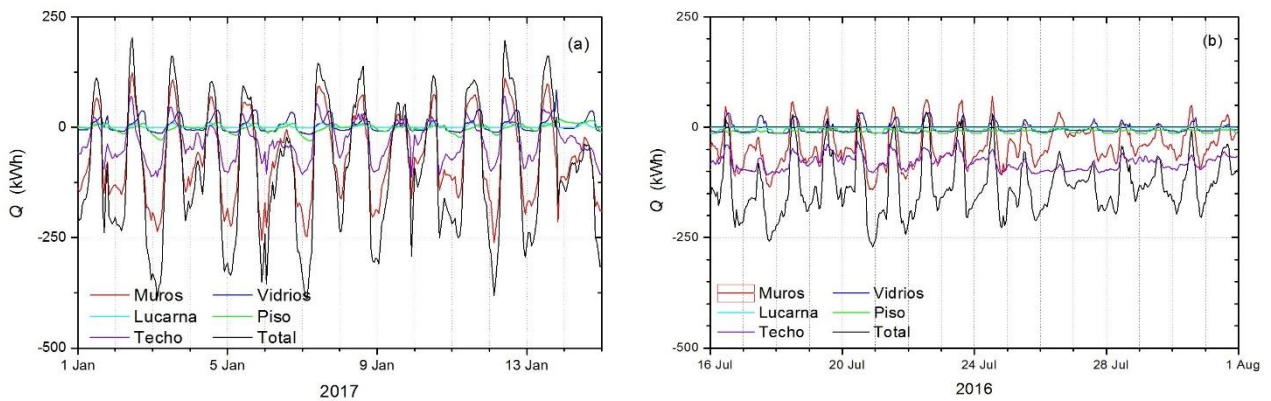


Fig. 3: Intercambio total de calor a través de la envolvente (línea negra) y de cada componente constructiva en verano (a) e invierno (b).

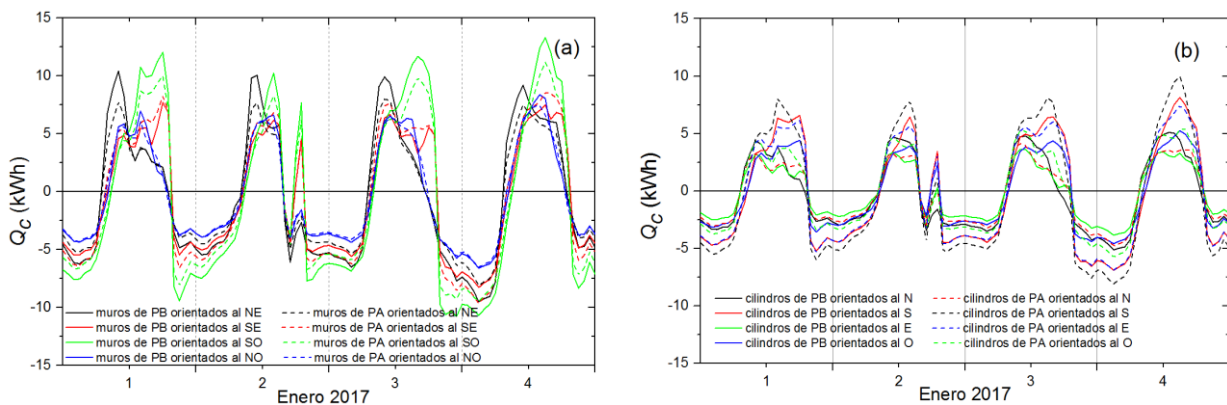


Fig. 4: Evolución del calor total ingresado por conducción a través de la superficie externa de (a) los muros, y (b) los cilindros. La simulación se hace considerando que la lucarna permanece cerrada

El intercambio de calor Q_R por radiación térmica infrarroja entre las superficies externas verticales de la envolvente y su entorno se muestra en la figura 6. Los muros orientados al SO y las superficies cilíndricas orientadas al O presentan el máximo de pérdida de calor al atardecer, como resultado del calentamiento solar producido durante ese tramo del día por

la incidencia de la radiación solar directa. Los valores negativos (positivos) de Q_R indican que las paredes externas de la envolvente se encuentran a mayor temperatura que el ambiente externo y, como consecuencia, existe una persistente pérdida de calor por emisión de radiación IR.

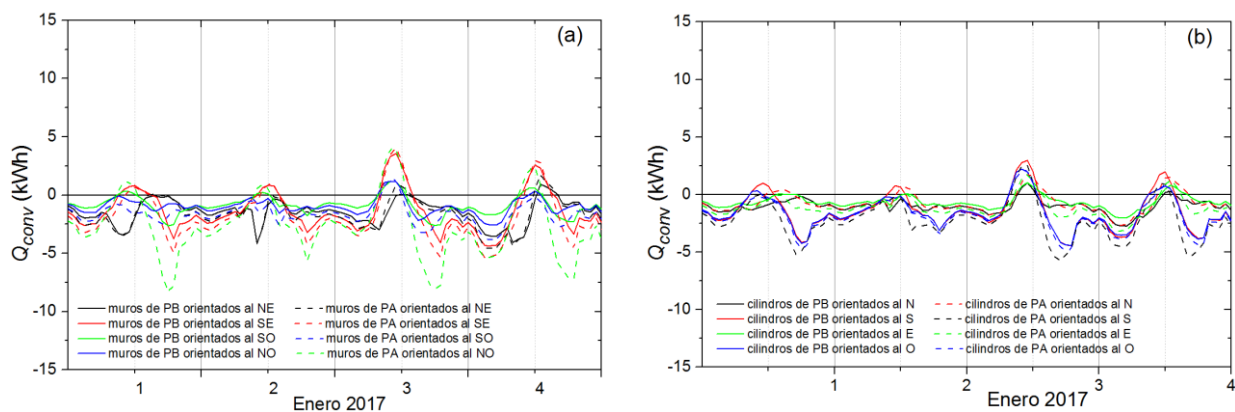


Fig. 5: Evolución en los primeros días de enero de 2017 del calor total transmitido por convección a través de la superficie externa de (a) los muros, y (b) los cilindros. En ambos casos simulados, se establece que la lucarna permanece cerrada.

El intercambio energético a través del techo requiere un análisis separado debido a su exposición a la radiación solar y a la emisión IR al cielo. Se encuentra que el calor ganado Q_{RS} debido a la radiación solar recibida en verano es aproximadamente el doble que en invierno. En verano, el calor absorbido durante las horas de luz solar es almacenado mayormente en el mismo techo y liberado como radiación IR durante todo el día con máximos a la tarde-noche. En invierno, el calor liberado como radiación IR es casi igual al liberado en verano y es mayor que el recibido como radiación solar incidente. Esto se debe a que en invierno la menor radiación solar se compensa con la pérdida de calor por conducción desde el interior del edificio.

3.4. Intercambio de calor a través de las superficies vidriadas.

En la figura 7 se representa el flujo de calor entrante a través de las aberturas de vidrio. Este flujo incluye las componentes asociadas con la radiación solar visible directa entrante, la radiación visible difusa que se pierde hacia el exterior, y el calor transmitido por conducción y convección a través de las superficies vidriadas y sus marcos. La máxima cantidad

entrante por una superficie específica depende de la orientación, la protección que brindan los aleros del edificio y el área total de vidrio con cada orientación. En verano (Fig. 7a), a la mañana temprano, predomina el transporte de calor hacia el interior a través de las superficies orientadas al NE; al mediodía predomina el calor entrante por las superficies vidriadas orientadas al NO (frente del edificio), y hacia la tarde-noche predominan el flujo de calor a través de los paneles orientados al SO (cuando la radiación solar les impacta plenamente). En PA, el ingreso de calor siempre es mayor que en PB. En invierno (Fig. 7b), los aleros de la fachada frontal permiten un ingreso importante de calor al mediodía mientras disminuyen el calor ingresado por los paneles vidriados orientados al SO. El calor total entrante de esta forma compensa en buena medida el calor perdido durante la noche. Por su parte, cuando se analiza el intercambio de calor a través de la lucarna que corona el atrio central se encuentra que, a pesar de su tamaño reducido frente al área total del techo, en verano el edificio gana 1,5 kWh promedio diario por esta superficie mientras que pierde 0,15 kWh en invierno.

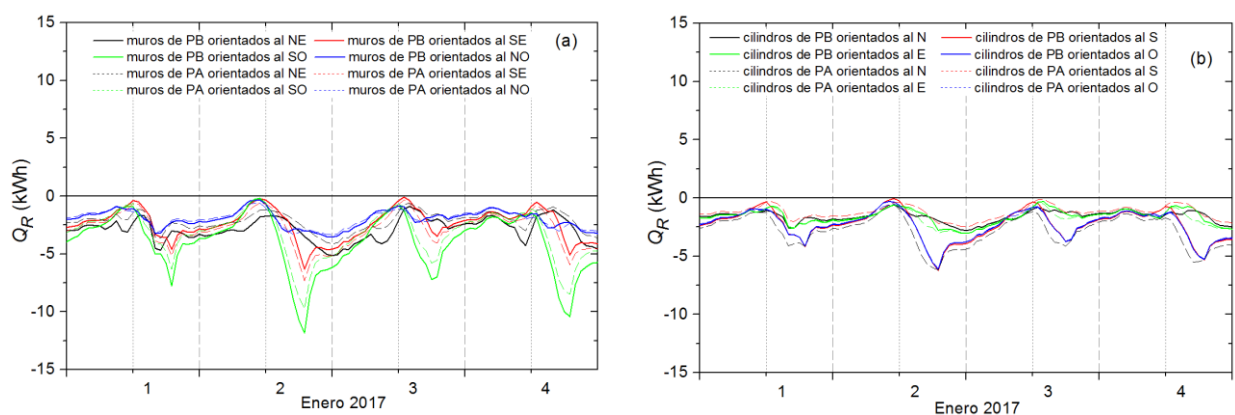


Fig. 6: Evolución del calor total intercambiado por radiación a través de la superficie externa de (a) los muros, y (b) los cilindros. Ambos casos se simulan considerando la lucarna cerrada.

3.5. Efecto de la ventilación natural.

Cuando se simula la temperatura T_i considerando al edificio cerrado y con los ventilotes de los cerramientos vidriados abiertos durante el día o solamente durante la noche, no se observan diferencias apreciables, lo cual indica la escasa posibilidad de ventilar el interior del edificio. Como $T_i \approx 29^\circ\text{C}$

bajo condiciones atmosféricas propias del verano, muy por encima del nivel de confort. Sin embargo, esto cambiaría si la lucarna y los ventilotes se abrieran completamente durante la noche (entre la hora 21:00 y la 8:00), y se mantuvieran cerrados durante el día. La figura 8a muestra los resultados cuando se implementa la ventilación conducida por diferencia

de temperatura (efecto chimenea), y se agrega la ventilación conducida por el viento (ventilación cruzada). De aquí que, existe la posibilidad de refrescar el interior de la Biblioteca Central en más de 5°C si se recurre a la ventilación nocturna en verano abriendo completamente la lucarna. En este caso, T_i se ubica mayormente dentro del rango de confort térmico.

Sin embargo, la Fig. 8b muestra que, si se agrega el calor generado por las luminarias y por 30 personas entre la 08:00 y la 20:00, al mediodía se superaría la temperatura máxima de confort.

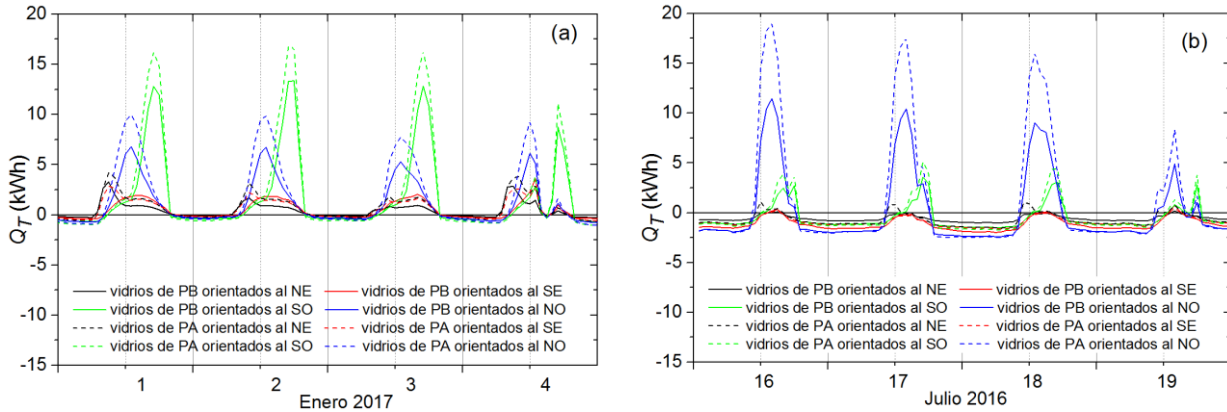


Fig. 7: Flujo de calor transmitido hacia el interior del edificio a través de las superficies vidriadas en verano (a) e invierno (b).

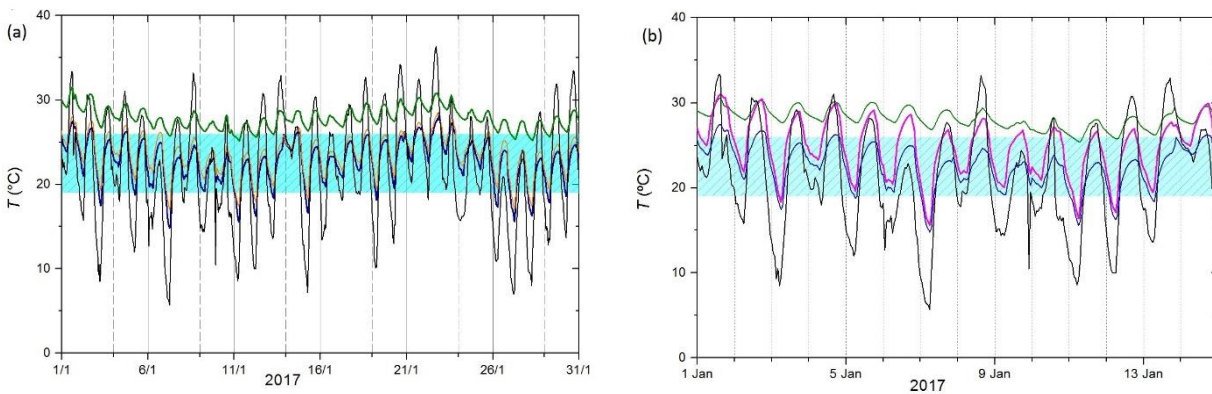


Fig. 8: Evolución de la temperatura externa (línea negra), la temperatura interna promedio simulada considerando el efecto chimenea y el viento (línea azul) y la temperatura interna promedio simulada cuando (a) las aberturas se abren en su totalidad considerando el efecto chimenea únicamente (línea naranja) y (b) se encienden las luminarias y se considera la presencia de personas (línea magenta). La línea verde representa T_i simulada con todo el edificio cerrado. La zona sombreada corresponde a la zona de confort térmico.

4. ANÁLISIS

La simulación efectuada empleando el programa *EnergyPlus* permitió realizar el balance térmico general del edificio considerando todas sus partes. Además, la evolución de T_i fue corroborada por mediciones *in situ*. A diferencia de los modelos analíticos propuestos por Muñoz (2019) para determinar parámetros globales que caracterizan al edificio, *EnergyPlus* ofrece detalles del balance térmico de cada componente y, en el caso de las superficies vidriadas, incorpora el balance radiativo en el rango visible. Las simulaciones permiten integrar información meteorológica, geométrica, sobre las propiedades físicas de los materiales de construcción, localización, etc., para describir la evolución global de, por ejemplo, la temperatura T_i y el calor intercambiado con el exterior para analizar el comportamiento higro-térmico del edificio y evaluar su sustentabilidad energética. Pero además pueden analizarse sencillamente los efectos generados por cambios razonables en el diseño (e.g. realizar ampliaciones, agregar aberturas) y/o

probar estrategias de ventilación ante situaciones meteorológicas extremas. No obstante, los resultados globales así obtenidos pueden esconder defectos constructivos que atentan contra el establecimiento de las condiciones que permiten alcanzar el confort higro-térmico. En estos casos, es necesario el análisis particular de los procesos físicos involucrados en partes de la envolvente para poner en evidencia los detalles de interés.

Las condiciones térmicas del interior reflejan que el ambiente se encuentra fuera de la zona de confort durante el periodo estival. La ganancia de calor del edificio se genera fundamentalmente a través de las superficies vidriadas mientras que el techo permite evacuar buena parte del calor interno por emisión de radiación IR en forma sostenida durante la noche. Durante el día, una parte de la radiación solar directa que es absorbida por la superficie de la terraza también se emite en forma de radiación IR al ambiente exterior, disminuyendo así la influencia de la radiación solar sobre el calor ingresado al interior. Como se mencionó

anteriormente, los muros intercambian una significativa energía con el ambiente externo, almacenando calor durante el día y evacuándolo durante las noches, aunque este intercambio no afecta significativamente T_i . También se encuentra que los efectos de la humedad específica interna y de la externa no cambian los resultados, lo cual sugiere una escasa ventilación. En invierno, las principales pérdidas se producen por las superficies vidriadas y el techo. En los días invernales sin nubosidad, la radiación solar ingresa al interior compensando sólo parcialmente las pérdidas de calor producidas durante la noche. Por lo tanto, el confort térmico en los días fríos sólo puede alcanzarse proporcionando una importante cantidad de calefacción por medios mecánicos.

En resumen, el edificio de la Biblioteca Central puede caracterizarse térmicamente como sigue:

- Existe una leve estratificación del aire en el atrio central.
- Existe enfriamiento excesivo (debido a una importante pérdida de calor) en invierno que debe balancearse con el encendido de equipos de calefacción.
- Existe sobrecalentamiento en verano causado por la excesiva ganancia solar directa y la pobre ventilación, compensado parcialmente (en recintos pequeños y aislados del atrio central) con el uso de equipos de aire acondicionado.
- Si bien los muros de la envolvente cumplen con las disposiciones de las normas IRAM para la región geográfica, la gran cantidad de superficies vidriadas (especialmente sobre la fachada frontal), y a pesar de tratarse de paneles DVH, hace inviable lograr el confort térmico en invierno y difícil en verano sin tener que recurrir a dispositivos mecánicos de control de temperatura.
- Es imposible implementar la estrategia de ventilación natural eficientemente debido a la hermeticidad de la lucarna.

5. CONCLUSIONES

La simulación del comportamiento térmico del edificio de la Biblioteca Central (UNCPBA) con *EnergyPlus* arroja información sustancial para detectar sus fortalezas, defectos y las posibilidades de un mejor gerenciamiento energético de la unidad, complementando la proporcionada por los modelos matemáticos basados en el análisis inverso y el habitual análisis directo que usan los principios proporcionados por la física del movimiento del aire y el transporte del calor aplicados por Muñoz (2019). Todo el interior se encuentra fuera de la zona de confort higro-térmico durante el verano debido a fuertes ganancias de radiación solar y escasa ventilación natural, y en invierno el confort se logra a cambio de un oneroso gasto en calefacción. El sobrecalentamiento exhibido durante el estío, aunque perjudicial, es propio de los edificios construidos en la región central de Argentina para los que la relación área vidriada / área construida es alta (> 10%) (Follari y Filippín, 2012; Di Bernardo et al., 2011). En consecuencia, resulta evidente que el valor comúnmente sugerido por las normativas (15%–20%) debe disminuirse significativamente para prevenir sobrecalentamientos en verano.

Las modificaciones edilicias simuladas con el fin de optimizar la ventilación natural y –por ende– las condiciones internas de confort sin requerimientos energéticos adicionales, acercan el funcionamiento del edificio al de

sustentable energéticamente y ofrece a los profesionales de la construcción propuestas concretas para adecuar sus diseños a las características climáticas locales. Además, el análisis del comportamiento térmico de los diversos componentes de la envolvente puede constituir una base de información representativa aplicable a otras edificaciones de características constructivas similares en la zona. Luego, es de esperar que casos de estudio como el presentado contribuyan a concientizar sobre la reducción del consumo energético de edificaciones promoviendo la evaluación térmica de edificios pre-existentes en pos de mejorar el diseño original.

REFERENCIAS

- Chauvie V. (2004). Estudio de programas de simulación térmica de edificios para el clima de la ciudad de Montevideo: SIMEDIF, ARQUITROP y SETI. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **8**, 05.115–120.
- Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., ... y Glazer J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings* **33**, 4, 319–331.
- Di Bernardo A., Filippín C. y Pipa D. (2011). Monitoreo y simulación térmica energética de verano de una vivienda en condiciones reales de uso en clima templado cálido. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **15**, 08–67.
- Follari J. y Filippín C. (2011). Proyecto demostrativo bioclimático en San Luis. Tecnología y monitoreo térmico experimental. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **27**, 31–43.
- Flores Larsen S.E. (2011). Modelización de la transferencia de calor al suelo en los programas de simulación térmica de edificios EnergyPlus y SIMEDIF. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **15**, 8.27–34.
- Flores Larsen S. y Lesino G. (2001). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **9**, 15–24.
- Gonzalo G.E. (1998). Manual de Arquitectura Bioclimática. Editorial Arte-Color, Tucumán.
- IRAM 11603 (2011). Acondicionamiento térmico de edificios: Clasificación bioambiental de la República Argentina, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires. Recuperado de: URL: <www.iram.org.ar>
- Liu B.Y.H. y Jordan R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* **4**, 1–19.
- Muñoz N., Marino B.M. y Thomas L.P. (2015). Caracterización del comportamiento térmico de un edificio prototipo en Tandil (Buenos Aires). *Anales AFA* **26**, 2, 78–87.
- Muñoz N. (2019). *Caracterización térmica de un edificio construido según los estándares recomendados para la región centro bonaerense – Estimación de las pérdidas y ganancias de calor mediante el desarrollo de modelos específicos que contemplan análisis inverso y directo*. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
- Nota V.M., Ledesma S.L., Gonzalo G.E., Martínez C.F. y Tortones A.S. (2003). Evaluación del comportamiento higrotérmico, de asoleamiento y lumínico de edificios de oficinas en San Miguel de Tucumán. *Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente* **7**, 05.43–48

Saravia L. y Alía D. (2016). Programa SIMUSOL – TUTORIAL Termodinámica, Mecánica, Electricidad. Instituto de Investigación en Energías no Convencionales, Salta. Recuperado de:

<<http://www.simusol.org/downloads/simusol-tutorial-2016.pdf>>