

Caracterización del comportamiento térmico de un edificio prototipo en Tandil (Buenos Aires)

Characterization of the thermal behaviour of a prototype building in Tandil (Buenos Aires)

N. Muñoz Vásquez, B.M. Marino, L.P. Thomas¹

Grupo de Flujos Geofísicos y Ambientales, Facultad de Ciencias Exactas
CIFICEN, CONICET - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Pinto 399, B7000GHG Tandil, Argentina

Recibido: 07/11/14; aceptado: 22/05/15

La elección de la ubicación y orientación de una construcción y las decisiones tomadas en las etapas de su diseño tienen un importante efecto sobre el consumo energético necesario para su funcionamiento. Este es particularmente el caso para prever el óptimo aprovechamiento de la ventilación natural en el que las decisiones tempranas determinan el potencial para el uso renovable pasivo de la energía, lo cual se traduce en los menores costos energéticos y en la disminución de la contaminación del aire interior. El cuidadoso control sobre el aprovechamiento solar también puede reducir significativamente los costos derivados del uso de equipos de refrigeración o calefacción. Con el objeto de optimizar la construcción de edificaciones con mínimo consumo energético, se evalúa el comportamiento térmico durante el verano de una construcción representativa de los estándares edilicios de la ciudad de Tandil. Se presenta el análisis de las mediciones continuas y sistemáticas realizadas con sensores de temperatura y humedad en puntos específicos del interior, y de los parámetros meteorológicos externos, asociando la información mediante un modelo analítico que da cuenta de la conductividad, la radiación y la convección debida al viento. El objetivo es hallar los parámetros térmicos globales del edificio, y con ellos el flujo de calor a través de la envolvente, resolviendo el “problema inverso”. Los resultados son cotejados con los obtenidos resolviendo el “problema directo” estándar.

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

The choice of the location and orientation of a construction and the decisions made during the early stages of the design affect significantly the energy consumption necessary for its functioning. Particularly, this is the case in which the optimal use of natural ventilation is convenient to reduce energy costs and pollution of the air indoors. Careful control of the solar resource can also considerably diminish the costs derived from the use of air conditioners. The thermal behaviour of a building that is representative of the constructive procedure in Tandil city is evaluated during the summer with the purpose of optimizing future constructions that minimize the energy consumption. The analysis of continuous and systematic temperature and humidity measurements performed with sensors in specific points inside the building and the external meteorological parameters is presented. 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. The goal is to estimate the typical thermal parameters of the building and, with them, the heat flux across the envelope, solving the “inverse problem”. The results are compared with those obtained solving the standard “direct problem”.

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

I. INTRODUCCIÓN

Según las proyecciones del *Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático* (PICC), si no se toman medidas inmediatas para reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el calentamiento global podría acarrear consecuencias irreversibles al planeta. Una forma rápida y barata de contribuir a este fin consiste en impulsar la construcción de edificios eficientes en el consumo de energía y la adecuación de los ya existentes. En su cuarto informe de evaluación⁽¹⁾, el PICC señala que alrededor del 30% de las emisiones mundiales de GEI previstas en el sector de la

edificación se podrán evitar para 2030 con un beneficio económico neto y una mejora de la calidad del aire. Por sí solas, las mejoras en el aislamiento de las construcciones generarían un ahorro superior a 1.7 gigatoneladas (GT) en emisiones de CO₂ para 2030, mientras las mejoras en el alumbrado de bajo consumo de energía podrían reducir cerca de 0.4 GT⁽²⁾. La disminución del gasto de energía compensaría con creces los costos de inversión para lograr tal ahorro.

Actualmente, los requerimientos energéticos para refrigeración en el sector residencial corresponden al rubro de mayor importancia de energía demandada en

¹ Autor a quien dirigir la correspondencia: lthomas@exa.unicen.edu.ar

verano. También importa el gasto adicional para calefaccionar ambientes originado en las pérdidas de calor a través de la envolvente edilicia en invierno. 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, materiales y gestión de la ventilación natural. La caracterización térmica de los espacios habitables encuentra sus fundamentos en este contexto.

La forma usual de evaluar el comportamiento térmico de un edificio es integrando los aportes de las diversas componentes de la envolvente (muros, aberturas, techos, etc.). Para ello es necesario discernir como contribuye cada proceso de transmisión del calor (conducción, convección, radiación) y la acumulación de energía en el interior y en las paredes, ya que los flujos de calor asociados con cada mecanismo de transferencia no son independientes. 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. Los flujos convectivos de calor dependen de si el movimiento del aire es impulsado por el viento o por diferencias de densidad. A su vez, en la transmisión de calor por conducción, debe considerarse que la envolvente se compone de capas de diferentes materiales con propiedades físicas distintas, y en algunos casos existen 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. Otro factor que suma dificultad es el comportamiento térmico de los cerramientos, que resulta complejo de evaluar.

En Argentina, las normas IRAM ⁽³⁾ establecen los valores globales de los parámetros característicos para los materiales usados en edificaciones y la forma de calcular los flujos debidos a los diferentes procesos de transmisión del calor para las distintas zonas bio-climáticas. Puesto que los cálculos corresponden a condiciones climáticas extremas, son sólo adecuados para proyectar la obra. No obstante, los resultados determinan la categoría de la eficiencia de la aislación entre los niveles A y H, establecida por la norma IRAM 11900. En la provincia de Buenos Aires, las normas asociadas con el acondicionamiento térmico de edificios conducente a un consumo energético reducido en invierno vienen dadas 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. En este trabajo, las normas IRAM se emplean para determinar los parámetros característicos de los materiales y calcular los flujos de calor, aunque se aplican a las condiciones climáticas registradas durante los días de medición (ver sección VI).

Si se conocen los valores de todos los parámetros edilicios involucrados, entonces el comportamiento térmico no estacionario de una construcción puede determinarse resolviendo las ecuaciones diferenciales y/o integrales que rigen los procesos de transferencia de calor con las condiciones iniciales y de contorno adecuadas. Si no es posible obtener una solución analítica, puede recurrirse a códigos de simulación como *Simusol*, *Simedif*, *Autodesk*, *Ecotect*, *Energy Plus*, etc. ⁽⁴⁻¹⁰⁾.

El procedimiento empleado en el diseño y etiquetado de las edificaciones, basado en la resolución analítica o numérica de las ecuaciones que contemplan los procesos físicos involucrados (líneas negras en Fig. 1), se conoce en general como “resolución del *problema directo*”. Un aspecto crítico del cálculo lo constituyen las incertezas de los parámetros físicos y coeficientes semi-empíricos presentes en las ecuaciones. Si bien estos son provistos por las normas IRAM para materiales y aberturas típicas, sus valores pueden diferir de los 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, no siempre es posible evaluar la contribución combinada (no lineal) de los procesos de transferencia.

Un modo alternativo de trabajo consiste en resolver el *problema inverso* que implica obtener los valores de los parámetros del modelo y/o la información general de los procesos físicos a partir de los resultados o consecuencias (líneas rojas en 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.

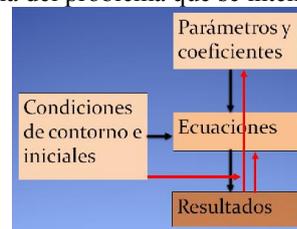


Figura 1: Etapas de la resolución directa (líneas negras) e inversa (líneas rojas) del problema asociado a la caracterización térmica de un edificio.

Si bien existen numerosos métodos para encarar los problemas inversos de la física ⁽¹¹⁾, se encuentran escasas referencias de casos aplicados al comportamiento térmico de las construcciones ⁽¹²⁻¹³⁾ como se hace en este trabajo. El objetivo aquí es hallar los parámetros característicos de una construcción que es representativa de los estándares edilicios de la ciudad de Tandil, midiendo la temperatura interior y exterior sistemáticamente, y así determinar las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior. El procedimiento se aplica 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). Los resultados son cotejados con los obtenidos resolviendo el problema directo.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

La ciudad de Tandil 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, influenciado por el arribo frecuente del pampero, la sudestada y de frentes fríos y cálidos que pueden originar cambios importantes y repentinos de las condiciones meteorológicas provocando variaciones apreciables de los valores medios de temperatura y humedad del aire que se mantienen durante varios días. Debido a la alta nubosidad registrada, la región no cuenta con un recurso solar significativo en invierno.

Según la norma IRAM 11603 de *Clasificación bioambiental de la República Argentina*, correspondiente a la zona IV(c) de clima templado frío de transición ⁽³⁾, los valores típicos para Tandil implican construir edificaciones con muy buena aislación en toda la envolvente, 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 mayor al 15%.

El edificio tomado como prototipo se encuentra ubicado en una zona residencial de baja densidad poblacional a 6.8km del centro urbano. Tiene dos plantas de 1745m² cada una, un atrio central rematado por una lucarna vidriada cerrada de 25m² y una fachada frontal dotada mayormente de superficies vidriadas. Los cerramientos de doble vidriado hermético con cámara de aire de 0.006m de espesor (transmitancia térmica $K = 3.2\text{W/m}^2\text{K}$) abarcan un área de 310m², mientras que las puertas y los paneles fijos vidriados con cámara de aire de 0.012m ($K = 2.8\text{W/m}^2\text{K}$) ocupan 37m². El resto de la fachada se compone de muros de 0.3m de espesor compuestos de revoque fino y grueso, ladrillo hueco (0.12m), azotado hidrófugo, plancha de poliestireno expandido (0.04m) y ladrillo visto (0.12m), cubriendo un área total de 415m². El valor de K obtenido con el procedimiento descrito en la norma IRAM 11601 es cercano al nivel A de confort higrotérmico referido en la norma IRAM 11605 y de acuerdo a la Ley provincial 13059 de aplicación obligatoria y al Decreto 1030/10. También se verifica que K cumple con lo especificado en la norma IRAM 11659-2 de ahorro energético en refrigeración durante el verano. La relación vidrio/opaco es 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. La misma se encuentra dentro del rango implicado en un modelo de distribución de los vidriados por orientación según criterio bioclimático.

III. METODOLOGÍA

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 $\pm 0.35^\circ\text{C}$ 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 lumínica (I) entre 1 y 30000 lux. 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 son proporcionados por la estación meteorológica del *Servicio Meteorológico Nacional* localizada a 15km del Campus pero en terrenos con similares características. Otra estación meteorológica *Sinometer* WS1081 del *Instituto de Hidrología de Llanuras* ubicada a 200m de la Biblioteca Central ofrece información complementaria medida cada 15min de 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.

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 valores de los parámetros globales que pueden luego 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. Los sensores ubicados a un mismo nivel de altura registraron valores de temperatura muy cercanos, y estos se promedian para trabajar con un único valor de la temperatura interna T_i por nivel, disminuyendo la incerteza de las mediciones. La Fig. 2(a) 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. Entre los días 1 y 4 de enero y 22 y 26 del mismo mes se registraron bajas pronunciadas de T_e que tardaron en manifestarse internamente, sugiriendo una buena aislación de la envolvente. La ampliación de las curvas para un corto periodo (Fig. 2b) muestra que prácticamente no hay desfase entre T_e y T_i indicando que la envolvente no presenta inercia térmica apreciable.

Durante la mayor parte del periodo de medición, el edificio permaneció cerrado y los acondicionadores de aire apagados, mientras el personal administrativo y usuarios se encontraban de vacaciones. Por lo tanto, la contribución de las fuentes internas de calor al intercambio con el exterior es mínima.

IV. MODELADO ANALÍTICO

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. 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 tipo de 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. La envolvente se compone de elementos (muros, ventanas, puertas, etc.), cada uno de área A_j , espesor e_j y transmitancia térmica K_j que incluye las resistencias térmicas superficiales dependientes de las capas límite de aire solidarias a las superficies externa e interna.

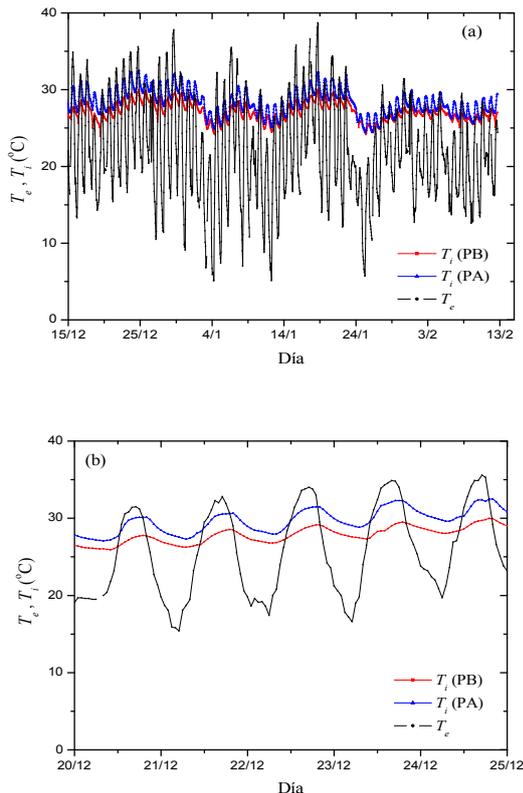


Figura 2: (a) Evolución de las temperaturas externas e internas durante 60 días del verano 2013-2014. (b) Detalle de la evolución de las temperaturas.

Otro factor a considerar es la inercia térmica en las paredes que produce una amortiguación de los cambios externos de temperatura y un retardo temporal Δt entre los máximos de T_e y T_i ⁽¹⁴⁾. La Fig. 2b muestra que Δt 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 con la amortiguación del flujo de calor) no son significativos. Esto se debe, principalmente, a la alta proporción de paneles vidriados que tienen inercia térmica despreciable ⁽¹⁵⁾.

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

$$Q(t) = (\sum K_j A_j) \cdot [T_e(t) - T_i(t)] \quad (1)$$

La distribución del calor ingresado aumenta T_i . La relación entre $Q(t)$ y el aumento de temperatura es

$$Q = (\sum m_j C_{pj}) \frac{dT_i}{dt} \quad (2)$$

donde m_j es la masa del elemento j de la envolvente o del interior del recinto, térmicamente vinculado con el resto, y C_{pj} es su calor específico. El producto $m_j C_{pj}$ es la *capacidad calorífica* o *masa térmica* del elemento. Igualando (1) y (2) se obtiene la ecuación diferencial simple

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

con
$$\tau = \frac{\sum m_j C_{pj}}{\sum K_j A_j} \quad (4)$$

El parámetro τ , asociado a la inercia térmica del edificio, es el tiempo de respuesta característico de la edificación frente a variaciones de la temperatura externa. Por ejemplo, si $T_e - T_i = \Delta T = \text{constante}$, la solución de (3) 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 se emplea en modelos térmicos dinámicos de una habitación o de edificaciones sencillas ⁽¹⁶⁾. Notar que cada uno de los parámetros que conforman (4) no es importante por sí mismo sino la relación entre la masa térmica del edificio y la transmitancia térmica de su envolvente.

La resolución del problema inverso consiste en encontrar τ a partir de los registros de la evolución de $T_i(t)$ y $T_e(t)$ por medio de la Ec. (3) en lugar de Ec. (4). Hay diferentes formas de estimar este tiempo que incluye el empleo de series de Fourier, funciones de autocorrelación, transformadas, etc. ⁽¹⁷⁾. En la sección V se emplea un método de cálculo similar al reportado por Davis ⁽¹⁸⁾, aunque no recurriendo a datos horarios sino a la totalidad de datos reunidos en 60 días para disminuir el error cometido en las mediciones y, consistentemente, el de los coeficientes resultantes.

Por otra parte, la radiación solar que ingresa a través de las superficies vidriadas es retenida en el interior por efecto invernadero, o bien indirectamente elevando la temperatura de las fachadas y cubiertas no vidriadas e incrementando el flujo de calor por conducción en una magnitud superior a la diferencia ΔT . La ecuación para calcular el flujo de calor a través de los cerramientos vidriados 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 ⁽¹⁹⁾.

El viento aumenta la disipación de energía en la envolvente (al actuar sobre la capa límite superficial) afectando 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, la 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 ⁽²⁰⁾.

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 de la radiación incidente (Wm^{-2}) y a la intensidad del viento u (ms^{-1}) ⁽²¹⁾, respectivamente. Sumando, además, posibles fuentes internas de calor, la Ec. (3) se transforma en

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

o

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

donde $a = 1/\tau$ (s^{-1}), b ($m^2C s^{-1}W^{-1}$) se relaciona con la captación solar media del edificio, c_1 ($^{\circ}C m^{-1}$) y c_2 (m^{-1}) se relacionan con el efecto convectivo del viento y de las infiltraciones, y d ($^{\circ}C s^{-1}$) con la generación interna promedio. Las Ecs. (5) y (6) sólo difieren en el término de la acción del viento en cuyo caso el flujo de calor asociado (disipado o entregado) también depende de la diferencia entre la temperatura del edificio y del aire ⁽²²⁾. Los coeficientes a , b , c , d no dependen de ΔT , de la radiación ni de la velocidad del viento, pero si obedecen a otros factores tales como la inclinación del sol a mediodía, características aerodinámicas, etc. aunque para el edificio evaluado no se encontraron dependencias significativas de estos.

Otro fenómeno a considerar es la irradiación nocturna. Esta es consecuencia de la propiedad del aire de la atmósfera que 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 produciría una disminución adicional de la temperatura.

V. RESULTADOS

En primer lugar, los coeficientes a , b , c , d de las Ecs. (5) o (6) se calculan para la PB. La Fig. 3 ilustra la dependencia del cambio temporal de T_i con ΔT , y de ella se infiere que la combinación de variables elegidas conduce a una relación lineal en acuerdo con (3), aunque se presenta una importante dispersión debido a otros efectos no contemplados en esa ecuación. La dispersión no se modifica sustancialmente si se cambia el valor de Δt en la abscisa, confirmando que la inercia térmica de la envolvente es despreciable, como ya se mencionó. La línea de trazo continuo es la recta de mejor ajuste que permite determinar $\tau \approx 1/0.75 = 1.34$ días y $d \approx 3.2$. Se observa también 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.

Para simplificar el análisis, se define la función auxiliar

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

que se representa en función de I_r en la Fig. 4 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 $b = 0.0025$.

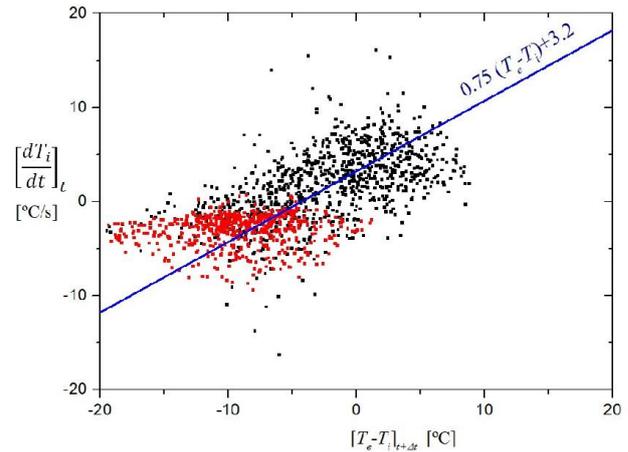


Figura 3: Derivada de la temperatura interior en función de ΔT correspondiente a las mediciones diurnas (símbolos negros) y nocturnas (símbolos rojos) en PB.

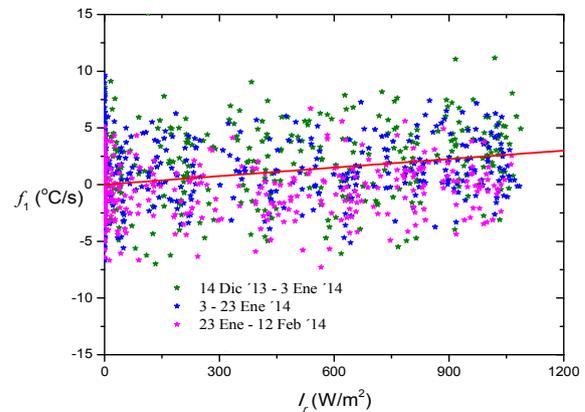


Figura 4: Variación de la función auxiliar f_1 con la intensidad de la radiación solar. La recta de mejor ajuste es $0.0025I_r$.

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. 5 y 6), se obtiene otra relación lineal en acuerdo con las Ecs. (5) o (6). Comparando el ajuste y la dispersión observados en las Figs. 5 y 6, se deduce que la dependencia es ligeramente mejor con $u(T_e - T_i)$ asociada con la Ec. (6), aunque un 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 la Ec. (6) para la PA del edificio se procede en forma análoga,

encontrándose $a \approx 1.3$, $b \approx 0.025$, $c_2 \approx -0.05$ y $d \approx 3$. Luego, comparando con los resultados de la PB, se encuentra que la PA presenta:

- + mayores pérdidas por conducción (73%), probablemente a través del 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.

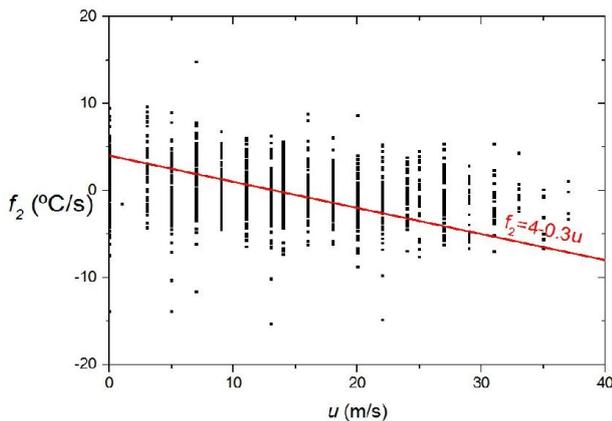


Figura 5: Variación de la función auxiliar f_2 con la intensidad del viento. De la línea de mejor ajuste resulta $c_1 = -0.3$ (Ec. 5).

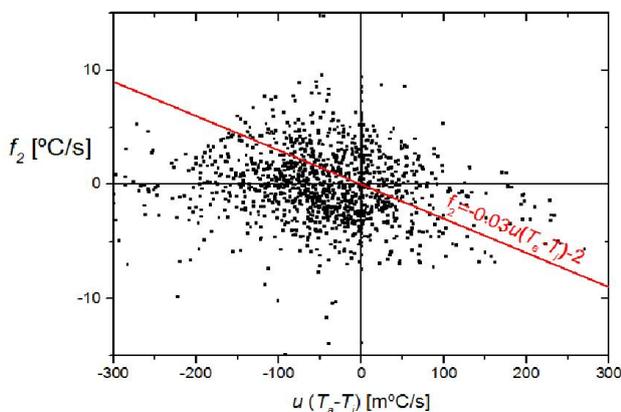


Figura 6: Variación de la función auxiliar f_2 con la intensidad del viento. De la línea de mejor ajuste resulta $c_2 = -0.03$ (Ec. 6).

Hallados los coeficientes, se integra (6) con la condición inicial $T_i(t=0) =$ primer valor medido el primer día del periodo analizado. En la Fig. 7 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 Ec. (6) y los coeficientes hallados dan cuenta de las características térmicas medias del edificio analizado.

Las contribuciones de cada término de la Ec. (6) al intercambio total de calor con el exterior se muestran en la Tabla 1. Considerando ambas plantas del edificio, 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 (verano) es el de la máxima radiación solar anual y por la alta proporción de superficies vidriadas en la envolvente edilicia. No obstante, estos valores pueden 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 que componen superficies selectivas frías por su valor de absorbancia (menor que el de la emitancia) permitiendo irradiar una buena parte de la energía que reciben ⁽¹⁵⁾.

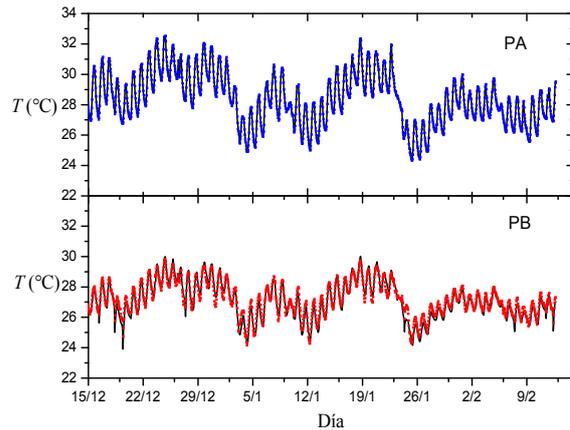


Figura 7: Comparación entre las temperaturas internas reales (símbolos) y aquellas estimadas con la Ec. (6) (líneas negras) en ambas plantas del edificio.

La desviación estándar obtenida es razonable dadas las simplificaciones del modelo empleado y el cálculo de una derivada. Un suavizado de las curvas disminuiría la dispersión, pero se muestra 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 dispersión grande implica que es necesario contar con un número apreciable de datos para obtener valores precisos de los coeficientes, pero también es conveniente que los datos se obtengan durante un número grande de días bajo diferentes condiciones atmosféricas para encontrar el comportamiento térmico promedio.

La búsqueda de una correlación entre las variaciones de T_i y otros parámetros medidos por las estaciones meteorológicas (en particular, la nubosidad, la humedad relativa ambiente y la dirección del viento) determinó que ninguno de estos parece afectar la respuesta térmica del edificio evaluado. La nubosidad no tiene influencia probablemente debido a los altos valores registrados y a los reducidos efectos del calentamiento por radiación solar y del enfriamiento por irradiación nocturna, en coincidencia con la clasificación ambiental de la zona de acuerdo a norma IRAM 11603. Una correlación entre las variaciones de la temperatura interna 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 en el presente caso sugiere una escasa ventilación del edificio.

VI. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DIRECTO

En la sección anterior se resolvió el problema inverso (es decir, a partir de las mediciones de temperatura) para determinar las contribuciones de los diferentes procesos de transferencia de calor a través de la envolvente. En particular, el flujo de calor debido a la conducción se encontró empleando la Ec. (3).

La Tabla 2 presenta los valores de los parámetros empleados en el cálculo del tiempo característico por medio de Ec. (4) de acuerdo al procedimiento indicado en las normas IRAM. La resolución del problema directo consiste en calcular el flujo de calor por unidad de área (en W/m²) a través de la envolvente edilicia

$$q = K(T_e - T_i), \quad (9)$$

y las resistencias superficiales R_{si} y R_{se} , midiendo la temperatura superficial de las componentes verticales de la envolvente del edificio evaluado y su espesor e , y conociendo las características de los materiales (por ejemplo, la conductividad k en W/mK) cuyos valores se encuentran tabulados para los estándares argentinos en la norma IRAM 11601. El valor de K de muros y aberturas al exterior se obtiene por medio de la resistencia térmica:

$$R = \frac{1}{K} = R_{si} + \frac{e}{k} + R_{se}. \quad (10)$$

En esta suma, un término corresponde a la conducción en el material y los otros representan las resistencias térmicas superficiales asociadas con la influencia de las capas límite interna y externa, respectivamente, establecidas por la convección natural del aire en contacto con las superficies.

Considerando la masa térmica total de la envolvente y la diferencia de temperatura promedio entre el interior y el exterior durante los días de medición, se obtienen $\tau \approx 1.65$ y 3.07 días para PB y PA, respectivamente, del mismo orden de magnitud que los determinados en la sección previa resolviendo el problema inverso.

La diferencia entre los resultados hallados planteando la resolución de los problemas directo e inverso radica en la incertidumbre de los valores adoptados para los parámetros, especialmente la masa térmica involucrada en la inercia térmica. En efecto, no toda la masa de la envolvente sigue la evolución de la temperatura interior. Por ejemplo, la masa térmica de la losa del techo aporta una proporción importante del valor total en PA, pero es más probable que su temperatura sea más próxima a la externa que a la interna, y por ende debería excluirse algún porcentaje de esta masa en el cálculo. De igual forma no se contempla la masa de los elementos del interior del edificio (libros, mobiliario, paredes de habitaciones interiores, etc.) que también aportan inercia térmica al conjunto.

Los valores de resistencias superficiales R_{si} y R_{se} representan otra fuente de incerteza. Por ejemplo, la norma IRAM 11601 establece para el diseño los valores $R_{si} = 0.13$ y $R_{se} = 0.04$ m²K/W para los muros verticales, aunque se aclara que “la resistencia térmica superficial varía en función de numerosos parámetros, tales como las propiedades de la superficie, en particular la emisividad, la velocidad del aire a lo largo de la superficie, y las

temperaturas de la superficie, del aire ambiente y de las superficies circundantes”. Efectivamente, la transferencia de calor por convección natural en un plano vertical depende además de si el régimen en la capa límite de aire es laminar o turbulento, de la altura L del plano, tomada como distancia característica, y del número de Rayleigh Ra_L . La fórmula que describe la transferencia de calor se complica aún más al agregar la acción del viento en una convección mixta (convección natural y forzada actuando simultáneamente).

No obstante las dificultades descritas, es posible establecer las resistencias superficiales en una edificación ya existente resolviendo el problema directo empleando la metodología reportada por Thomas *et al.* ⁽¹⁵⁾. En este caso, debido a las distintas capas de materiales que componen los muros se establecen, en función de las temperaturas del ambiente interior T_i y del aire exterior T_e , las temperaturas sobre las caras interna T_1 y externa T_2 medidas con una cámara termográfica. El flujo de calor en el estado estacionario es el mismo en todas las capas y su valor es dado por (9) que, usando (10), se transforma en:

$$q \left(R_{si} + \frac{e}{k} + R_{se} \right) = (T_i - T_e). \quad (11)$$

Luego,

$$qR_{si} = T_i - T_1, \quad (12a)$$

$$q \frac{e}{k} = T_1 - T_2, \quad (12b)$$

$$qR_{se} = T_2 - T_e, \quad (12c)$$

y las resistencias relativas resultan:

$$\frac{R_{si}}{R} = \frac{T_i - T_1}{T_i - T_e}, \quad (13a)$$

$$\frac{e/k}{R} = \frac{T_1 - T_2}{T_i - T_e}, \quad (13b)$$

$$\frac{R_{se}}{R} = \frac{T_2 - T_e}{T_i - T_e}. \quad (13c)$$

El flujo de calor que se pierde a través del área total A de la superficie, $Q_c = qA$, se calcula sumando las diferentes contribuciones de la envolvente mediante (12b), y las resistencias superficiales mediante (12a) y (12c). Así, la conductividad térmica efectiva de la envolvente resulta ser prácticamente la mitad de la conductividad específica de los materiales debido a las capas de aire superficiales interna y externa.

Para estimar directamente los flujos de calor asociados con la radiación solar Q_s , las infiltraciones de aire Q_i y las fuentes internas Q_f , se dispone de la norma IRAM 11659 y otras relacionadas. La carga térmica solar se calcula a partir de

$$Q_s = \sum_j F_j \cdot A_j \cdot I_r \quad (14)$$

donde A_j es el área y F_j es el factor de exposición solar de la superficie vidriada j , e I_r la intensidad de la radiación solar promedio para la ubicación del edificio. El factor F_j tiene en cuenta el tipo de vidrio y la protección solar de parasoles y cortinas si existen. Los valores de la radiación

de verano se extraen de la Tabla 10h de la norma IRAM 11659-1 para las fachadas verticales del edificio orientadas al NO, NE, SO y SE, y para una superficie horizontal en el caso de la lucarna.

La carga térmica de calor por infiltración Q_i , que incluye la del calor sensible y latente del aire, se calcula por medio de ⁽²²⁾

$$Q_i = C_p \gamma \vartheta \Delta T + C_l \gamma \vartheta \Delta Z \quad (15)$$

donde C_p es el calor específico y γ el peso específico del aire, respectivamente, C_l el calor latente de vapor del aire, ΔZ la diferencia de humedad específica y ϑ el caudal de aire calculado por

$$\vartheta = \sum_j C_{c_j} l_j \quad (16)$$

siendo C_{c_j} el coeficiente correspondiente al tipo de carpintería y l_j el perímetro de la abertura j .

Los resultados se presentan en la Tabla 3, y para los cálculos se usaron las diferencias de temperatura y humedad promedios entre el exterior y aquellas medidas en PB y PA.

Una comparación entre los resultados obtenidos resolviendo el problema directo y el inverso puede efectuarse si se considera que las infiltraciones son debidas al viento únicamente. Se encuentra que los valores del tiempo característico y los flujos de calor (correspondientes a los diferentes tipos de transmisión) obtenidos por el método inverso están comprendidos por la incerteza de los cálculos asociados al problema directo. Dicho de otra manera, los coeficientes y factores usados en las Ec. (14)-(16) en el problema directo se pueden ajustar para que los resultados globales sean los encontrados en la solución del problema inverso. El

TABLA 1: VALORES ABSOLUTOS DE CADA TÉRMINO DE LA EC. (6) EN °CS⁻¹ DURANTE LOS 60 DÍAS ANALIZADOS.

	Contribución	Promedio	Desviación estándar	Porcentaje (%)
PA	Conducción	9.00	6.03	54
	Radiación	0.75	0.91	5
	Viento	3.79	3.82	23
	Fuentes internas	3.00	0.00	18
PB	Conducción	4.75	3.26	52
	Radiación	0.75	0.91	8
	Viento	2.39	2.08	26
	Fuentes internas	1.20	0.00	13

TABLA 2: VALORES DE LOS PARÁMETROS ASOCIADOS CON LAS COMPONENTES DE LA ENVOLVENTE Y TIEMPOS CARACTERÍSTICOS CALCULADOS CON EC. (4). LOS VALORES DETERMINADOS DE R_{SI} Y R_{SE} SE CONSIDERAN EN EL CÁLCULO DE K.

Componente	Material	e (m)	K (W/m ² K)	P (Kg/m ³)	Área (m ²)		Cp (J/KgK)	ΣmCp		ΣAK	
					PB	PA		PB	PA	PB	PA
1- Vidrios DVH	Cámara de aire	0.006	2.073	1.2	171	201	1000	1	1	354	417
	Vidrio	0.018		2500				5771	6784		
2- Vidrios DVH	Cámara de aire	0.012	1.897	1.2	19		1000	0		36	
	Vidrio	0.018		2500				641			
3- Muros	Revoque fino	0.005	0.643	1400	309	300	1000	2163	2100	199	193
	Revoque grueso	0.020		1400				9085	8820		
	Ladrillo hueco	0.120		800				27291	26496		
	Poliestireno	0.035		17				313	303		
	Ladrillo visto	0.120		1100				40788	39600		
4- Techo (losa)	Hormigón	0.100	0.615	1800		1202	1000		267120		739
	Carpeta	0.020		1500				1300	57876		
	Geotextil	0.050		300				1350	30051		
	Contrapiso	0.026		600				1300	29517		
	Poliestireno	0.05		17				1700	2179		
	Yeso	0.01		600				837	1765		
	Cámara de aire	0.5		1.2				1000	603		
	Chapa Galv.	0.002		8000				500	2256		
5- Techo (chapa)	Poliestireno	0.05	17	1700	407	173					
	Cámara de aire	1.5	1.2	1000	508						
6- Lucarna	Vidrio Blindado	0.008		2500	25	750		656		15	
7- Piso	Baldosa	0.020	1.52	1700	1509		800	41045		2294	
	Roca	0.130		1200			1200	282485			
								410239	470219	2883	1538
										$\tau_{PB}(h)$	$\tau_{PA}(h)$
										39.53	73.56

TABLA 3: FLUJOS DE CALOR (EN W) CALCULADOS POR MEDIO DE LAS EC. (14)-(16).

	Q_c		Q_s		Q_f		Q_i		Q_{Total}	
	PB	PA	PB	PA	PB	PA	PB	PA	PB	PA
Subtotales	16143	9380	3088	3209	724	724	1308	1742	21877	15733
%	74	60	14	20	3	5	9	15	100	100
Totales	25523		6297		1448		4342		37610	
%	68		17		4		12		100	

cálculo inverso carece de una posibilidad de corrección análoga ya que se basa en mediciones y procedimientos estándar de mejor ajuste a conjuntos de datos.

VII. CONCLUSIONES

Se analizan los resultados del monitoreo térmico durante 60 días del verano 2013-2014 en un edificio cuyo tipo de construcción es representativo de una ciudad del centro bonaerense. El periodo 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.

En el marco de la resolución del problema inverso, se calcularon las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior, distinguiendo el comportamiento en las PB y PA y para condiciones reales de funcionamiento. La aplicación de este procedimiento para evaluar térmicamente una construcción ya existente es novedosa y más eficiente que el método directo. Se basa en mediciones sencillas durante periodos establecidos por el usuario, requiere menos cálculos y no tiene coeficientes de ajuste lo cual disminuye la incerteza de los resultados. También es más general debido a que la evolución de la temperatura T_i se relaciona matemáticamente con todas las variables relevantes disponibles (i.e., los datos registrados por las estaciones meteorológicas y las mediciones *in-situ*). De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo propuesto resulta especialmente útil cuando se debe estimar el comportamiento térmico global de edificaciones disponiendo de pocos datos para lograr una buena estimación de la masa térmica interna, y para comprobar los valores de los parámetros físicos involucrados en los diferentes procesos de transmisión del calor a través de la envolvente. Por último, la metodología resulta ventajosa para guiar a arquitectos y constructores en el mejoramiento de las condiciones higrotérmicas internas de edificaciones, y para comparar con los valores de los parámetros edilicios empleados en el diseño.

AGRADECIMIENTOS

La investigación es financiada por el PICT 2202/12 de la ANPCyT.

VIII. REFERENCIAS

1- PICC. *Institutional Efforts for Green Building in the United States and Canada*, "Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change". Contribución del Grupo de trabajo III al

Cuarto informe de evaluación del panel sobre cambio climático, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave y L.A. Meyer (eds.), CUP, Reino Unido/ New York (2007).

2- Vattenfall. *Climate Map*, en <http://www.vattenfall.com/www/ccc/ccc/569512nextx/573859globala/574118cost/index.jsp?origin=search> (2007).

3- Normas IRAM, en: <http://www.iram.org.ar/>

4- Flores Larsen, S., C. Filippín y L. Flores. *The Open Construction and Building Technology Journal*, **2**, 217-223 (2008).

5- Tian, Z. y J.A. Love. *Energy and Buildings*, **41**, 320–330 (2009).

6- Di Bernardo, A., C. Filippín y D. Pipa. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **15**, 08.35-42 (2011).

7- Suárez, H. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **16**, 08.167-172. (2012).

8- Garzón, B. y C. Mendonca. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **16**, 05.39-44 (2012).

9- Raftery, P., K.H. Lee, T. Webster y F. Bauman. *Applied Energy*, **90**, 250–257 (2012).

10- Boutet, M.L., A.L. Hernández y G.J. Jacobo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **17**, 05.01-10 (2013).

11- Tarantola, A. "Inverse problem theory and methods for model parameter estimation", SIAM, Filadelfia (2005).

12- Kramer, R., J. von Schijndeln y H. Schellen. *Frontiers of Architectural Research*, **1**, 318–325 (2012).

13- Kramer, R., J. van Schijndel y H. Schellen. *Building and Environment*, **68**, 87–99 (2013).

14- Davies, M.G. *Applied Energy*, **18**, 179-238 (1984).

15- Thomas, L.P., B.M. Marino y N. Muñoz. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. En prensa (2014).

16- Davies, M.G. *Building Heat Transfer*, 1ª Ed, pp. 8-15, Cap. 1. John Wiley & Sons, Chichester, RU (2004).

17- Urbikain, M.K. y M.G. Davies. *Build. Environ.*, **43**, 9, 1433-1445 (2008).

18- Davies, M.G. *Build. Environ.*, **39**, 1, 109-112 (2004).

19- Duffie, J.A. y W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2ª Ed, pp. 174-175, Cap.3. Wiley-Interscience, Nueva York, EEUU (1991).

20- Volantino, V.L y E.J. Cornejo Siles. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **11**, 08.51-57 (2007).

21- De Paul, I. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **10**, 03.21-28 (2006).

22- Díaz, V.S. y R.O. Barreneche. Acondicionamiento térmico de edificios. 1^{ra} Ed, pp.15-16, Cap. 1. Nobuko, Buenos Aires, Argentina (2005).