

EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS CONTRIBUCIONES AL FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE LOS MUROS DE LA ENVOLVENTE INCLUYENDO LOS EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

L.P. Thomas¹, B.M. Marino¹, N. Muñoz²

Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales – Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro
Provincia de Buenos Aires, 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 06/08/18, aceptado 19/09/18

RESUMEN: La temperatura externa de un edificio depende del lugar de emplazamiento y presenta variaciones periódicas anuales (debidas a cambios estacionales), diarias y otras aleatorias que dependen de factores meteorológicos. Las primeras son tan lentas que el flujo de calor por conducción a través de los muros de la envolvente puede considerarse en régimen estacionario mientras las segundas imponen una dinámica más compleja para la transferencia de energía. En este trabajo se presenta una metodología que permite relacionar el flujo de calor estacionario y aquel asociado con la respuesta dinámica de la envolvente con los valores medios y las variaciones diurnas de temperatura externa respectivamente, incluyendo los efectos de la radiación solar. La misma se basa en mediciones in situ, emplea las temperaturas superficiales de ambas caras de la envolvente, y se aplica a la evaluación del comportamiento térmico de un edificio del centro bonaerense.

Palabras clave: transferencia de calor, régimen no estacionario, temperaturas superficiales, condiciones reales de uso.

INTRODUCCIÓN

Una de las mayores preocupaciones actuales a nivel global compete a la disponibilidad y costos de la energía, encontrándose el sector edilicio como uno de los principales demandantes de la misma. El logro del confort interior resulta cada vez más relevante, llegando a configurarse como una exigencia ineludible que alienta la adquisición de equipos de aire acondicionado, estufas eléctricas, calefactores, etc. De aquí surge la relevancia de los avances en la comprensión de los mecanismos de transferencia de calor a través de la envolvente edilicia para tomar decisiones mejor fundamentadas durante la etapa de diseño, elegir y disponer los sistemas de climatización y prever su costo, y decidir los cambios a realizar en edificios pre-existentes para bajar el gasto energético que conlleva el confort térmico.

Usualmente se considera que el flujo de calor q (W/m^2) transmitido por conducción a través de un muro es proporcional a la diferencia entre las temperaturas del aire en el exterior (T_e) e interior (T_i), bajo la hipótesis de régimen estacionario que no siempre se cumple. La relación de proporcionalidad se satisface mediante el coeficiente de transferencia de calor total U ($\text{W/m}^2\text{°C}$) que depende de la conductividad térmica k de los materiales y de las resistencias térmicas de las capas límites superficiales de aire interna (R_{si}) y externa (R_{se}). El procedimiento estándar de cálculo es establecido por las normas técnicas (e.g. ISO, ASHRAE, CIBSE, IRAM en Argentina) y programas de cálculo que

¹ Investigador Independiente CONICET

² Becaria Doctoral CONICET

facilitan las operaciones matemáticas. Si se desea evaluar el efecto de las variaciones temporales de q es necesario conocer, además de k , la densidad ρ y el calor específico C_p de cada capa de material que compone la envolvente y resolver la ecuación de calor dependiente del tiempo (Ibarra, 2012; Karnele y Davies, 2008; Thomas et al., 2018). La respuesta dinámica de las edificaciones a las variaciones sinusoidales de T_e puede determinarse mediante la admitancia térmica Y , en cuyo caso q se halla aplicando el *método de la admitancia* (Pipes, 1957). Los factores no considerados cuando el flujo de calor a través de la envolvente es no-estacionario son la atenuación f del flujo de energía en función de la distancia (o factor de decremento) y el tiempo de retardo τ entre la diferencia máxima de temperatura y el máximo flujo de calor. Estos factores modifican la relación entre q y $(T_e - T_i)$ planteada en el régimen estacionario. Muchos estudios fueron realizados considerando las soluciones analíticas propuestas por las normas técnicas y en algunos casos los resultados fueron validados por simulaciones numéricas (Sahu et al., 2012; Saboor y Ashok Babu, 2015a,b; Roberz et al., 2017; Muscio y Akbari, 2017, entre otros). En particular, Muñoz et al. (2015) emplean el método de la admitancia para cuantificar la transferencia de calor a través de las paredes compuestas de múltiples capas de la envolvente del mismo prototipo que se evalúa en este trabajo.

En consecuencia, es usual encontrar en la bibliografía referencias al flujo de calor q_{ss} en el estado estacionario, o al flujo de calor $q_v(t)$ asociado con la respuesta dinámica de la envolvente a las variaciones diurnas de temperatura. A nuestro conocimiento, no se encuentran estudios que consideren los respectivos efectos de q_{ss} y q_v en un dado problema, ni una forma práctica que los asocie para evaluar el comportamiento térmico de una construcción que incluya los efectos de la radiación solar. Para revertir esta carencia, se presenta una metodología para determinar q_{ss} y q_v empleando las temperaturas superficiales de las caras interna (T_{si}) y externa (T_{se}) de la envolvente con el objetivo de evidenciar la importancia relativa de cada uno de estos flujos de calor. Se encuentra conveniente relacionar q con T_{se} y T_{si} en lugar de hacerlo con T_e y T_i puesto que así se prescinde del cálculo de R_{se} y R_{si} . Por otra parte, T_{se} y T_{si} son fácilmente medibles aplicando la técnica de termografía infrarroja (TTIR), o bien estimándose las teóricamente en forma sencilla incluyendo la radiación solar. La metodología propuesta se aplica a un caso de estudio para el cual se analizan los cambios de q_{ss} y q_v a través de los muros de la envolvente en las diferentes estaciones del año.

MÉTODOS DE CÁLCULO Y MEDICIONES

Flujo de calor variable a través de la envolvente

Considérese la transferencia unidimensional del calor q por conducción a través de un muro compuesto de un material homogéneo entre $x = 0$ y $x = \ell$. Los valores de T_{se} y T_{si} en todo instante de tiempo constituyen, en este caso, las condiciones de contorno. La solución de la ecuación de calor puede hallarse por separación de variables por lo que la temperatura se expresa como $T(x,t) = X(x)\Theta(t)$. Si la diferencia $(T_{se} - T_{si})$ varía periódicamente con el tiempo con frecuencia angular $\omega = 2\pi/P$ y periodo P , entonces $\Theta(t) = e^{i\omega t}$, y la función que depende de la variable espacial surge como solución de la ecuación $\partial^2 X(x)/\partial x^2 - i(\omega/D)X(x) = 0$, donde D es la difusividad térmica (m^2/s) del material, cuya solución es:

$$X(x) = c_1 \cosh(\sigma x) + c_2 \sinh(\sigma x) \quad (1)$$

con c_1 y c_2 constantes, $\sigma = p(i+1)/\ell$ y $p = \sqrt{\omega\ell^2/2D}$. Si $T_{se} = \text{Re}\{T_{se0}e^{i\omega t}\}$ y $T_{si} = \text{Re}\{T_{si0}e^{i\omega t}\}$, entonces resulta que $c_1 = T_{se0}$ y $c_2 = T_{si0} - T_{se0} \cosh(\sigma\ell)/\sinh(\sigma\ell)$. Puesto que

$$q(x,t) = -k \partial T(x,t)/\partial x, \quad (2)$$

surge que $q_{se} = \text{Re}\{q_{se0}e^{i\omega t}\}$ es el flujo transmitido a través de la superficie externa mientras

$q_{si} = \text{Re}\{q_{si0}e^{i\omega t}\}$ es el flujo que atraviesa la superficie interna, con

$$\begin{cases} q_{se0} = b_{11}(T_{se0} - T_{si0}) \\ q_{si0} = b_{21}(T_{se0} - T_{si0}) \end{cases} \quad (3)$$

La temperatura T_{si0} se toma como referencia, mientras $b_{11} = \frac{k}{\ell} p(i+1) \frac{\cosh[p(i+1)]}{\sinh[p(i+1)]}$ y $b_{21} = \frac{k}{\ell} p(i+1) \left\{ \sinh[p(i+1)] - \frac{\cosh^2[p(i+1)]}{\sinh[p(i+1)]} \right\}$ son números complejos cuya parte real es la amplitud de la onda y la parte imaginaria da cuenta del desfase de q con respecto a T_{se} . Por ejemplo, el flujo de calor a través de la cara externa se expresa en la forma $q_{se}(t) = \text{Re}\{q_{se0}\} \sin[\omega(t - \tau_{T_{se}})]$, quedando la parte imaginaria de q_{se0} expresada en función del desfase o tiempo de retardo $\tau_{T_{se}}$.

La matriz de transmisión de calor global de la envolvente depende de las propiedades de los materiales que componen sus múltiples capas y de la ubicación de estas capas. Los coeficientes b_{11} y b_{12} se calculan multiplicando las matrices de números complejos que corresponden a las matrices de transmisión individuales. Así pueden calcularse la amplitud y la fase de los flujos de calor variables a través de las superficies externa q_{se0} e interna q_{si0} empleando la Ec. (3) para los diferentes componentes constructivos. Para los muros de interés en este trabajo, los coeficientes b_{11} , b_{21} y b_{22} , y los factores de respuesta se presentan en la Tabla 1 (Muñoz et al., 2015).

Factor	Símbolo	Valor	Unidad
	b_{11}	5.710 + 8.840i	W/m ² °C
	b_{21}	- 0.122 - 0.336i	W/m ² °C
	b_{22}	- 2.930 - 5.330i	W/m ² °C
Tiempo de retardo	τ	- 7.330	h
Factor de decremento	f	0.564	---
Admitancia	Y	10.500	W/m ² °C
Transmitancia dinámica	u	0.358	W/m ² °C
Transmitancia en el régimen estacionario	K_T	0.630	W/m ² °C

Tabla 1: Coeficientes de transferencia de calor y características dinámicas de los muros de la envolvente del edificio evaluado.

Determinación de las variaciones temporales de q_{si}

La condición de confort implica que T_i debe encontrarse en un rango acotado en torno a los 20°C. Por su parte, T_e depende del lugar de emplazamiento del edificio presentando variaciones periódicas anuales ($P = 365$ días) debidas a cambios estacionales y diarias ($P = 1$ día), además de aquellas aleatorias que dependen de los factores meteorológicos. Para muros típicos en Argentina, se encuentra $\omega \ell^2 / 2D \ll 1$ para $P = 365$ días y $\omega \ell^2 / 2D \approx 1$ para $P = 1$ día. De Ecs. (1) y (2) se infiere que el flujo de calor a través del muro es uniforme cuando se consideran las variaciones debidas a cambios estacionales ($P = 365$ días), es decir, estas variaciones son tan lentas que q alcanza un régimen que puede considerarse estacionario resultando proporcional a $(T_{se} - T_{si})$.

Por el contrario, las variaciones rápidas ($P = 1$ día) juegan un papel importante en la transferencia de energía imponiendo una dinámica más compleja. En este caso, el comportamiento térmico de los muros se analiza durante un intervalo de tiempo mayor a 1 día pero mucho menor que 1 año. Las variaciones de T_{si} son mucho menores que las de T_{se} de modo que puede suponerse $T_{si} \approx$ constante, mientras T_{se} se expresa mediante el desarrollo en serie de Fourier:

$$T_{se} = T_m + T_v \sin \omega(t - \tau_{T_{se}}) + \text{términos de mayor frecuencia}, \quad (4)$$

Donde: T_m es el valor medio, $T_v = (T_{se0} - T_{si0})$ es la amplitud de las variaciones periódicas de T_{se} tomando $P = 1$ día de aquí en más. El primer armónico $T_v \sin \omega(t - \tau_{T_{se}})$ determina la amplitud de las variaciones. Más adelante, en la sección Resultados, se encuentra que los armónicos superiores, si bien definen la forma de la función que describe a las variaciones temporales de T_{se} (y que resulta ser distinta de la función seno), no contribuyen significativamente a determinar la amplitud total. Así, tomando los dos primeros términos de la Ec. (4), el cálculo se simplifica aunque reteniendo el orden de magnitud de las variaciones. Con este ajuste se obtienen T_m , T_v , y el retardo $\tau_{T_{se}}$ de las variaciones de T_{se} con respecto al origen del tiempo tomándose como tal la hora 0:00 del día. Para considerar las variaciones debidas a los cambios estacionales, se aplica la Ec. (4) para diferentes épocas del año.

Luego, es posible calcular el flujo total de calor q_T sumando las contribuciones estacionaria q_{ss} y periódica q_v , cada una calculada en forma independiente, es decir, superponiendo soluciones debido a la linealidad de la ecuación del calor. Así, $q_T = q_{ss} + q_v$, donde:

$$q_{ss} = K_T (T_m - T_{si}) = K_T \Delta T_m, \quad (5)$$

K_T es la transmitancia térmica total asociada con la resistencia total de la envolvente $R_T = K_T^{-1} = \sum_r (e_r / k_r)$ que da cuenta de las resistencias de las capas de espesor e_r que la conforman, y ΔT_m representa el valor medio de $(T_{se} - T_{si})$ en el intervalo temporal analizado. Notar que, si $T_{si} \approx \text{const}$, $\Delta T_m = \langle T_{se} - T_{si} \rangle \approx \langle T_{se} \rangle - T_{si} = T_m - T_{si}$.

Por otro lado, la amplitud T_v permite calcular los valores complejos de los flujos máximos q_{se0} y q_{si0} con la Ec. (3). Finalmente, la transferencia de calor se describe mediante los flujos totales $q_{se} = q_{ss} + q_{se0} \sin \omega[t - (\tau_{qe} + \tau_{Te})]$ y $q_{si} = q_{ss} + q_{si0} \sin \omega[t - (\tau_{qi} + \tau_{Te})]$ donde $q_{sj0} = \text{Re}\{q_{j0}\}$ es la amplitud de las variaciones del flujo de calor y τ_{qj} es el desfase entre el flujo de calor q_{sj} y la temperatura T_{se} , siendo $j = e, i$.

Medición de temperaturas y características del edificio evaluado

El edificio evaluado es el de la Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. El mismo fue diseñado y construido según normas técnicas provinciales de cumplimiento obligatorio para construcciones en la zona. Tiene dos plantas y se encuentra en la zona semi-rural de Tandil, caracterizada por su clima templado y húmedo (subhúmedo serrano), con veranos suaves y poca amplitud térmica anual. La envolvente se compone de sectores constructivos que combinan mampostería y paneles vidriados [ver detalles en el trabajo de Thomas et al. (2014)]. Los muros de 0.30 m de espesor se componen de una capa de ladrillo visto de 0.12 m, placa de poliestireno expandido de 0.035 m, azotado hidrófugo, ladrillo hueco de 0.12 m y revoques grueso y fino en el interior. El valor de K_T incluido en Tabla 1 se calcula siguiendo el procedimiento indicado en la norma IRAM 11601 sin considerar las resistencias superficiales (Ec. 5). El comportamiento térmico de los muros, paneles vidriados, techo, sectores que contienen las calderas y el piso presentan características distintas y deben analizarse en forma independiente. En este trabajo, por razones de claridad y brevedad, se reporta sólo el análisis efectuado de los muros enfrentados al N y S que reciben la mayor y menor cantidad de radiación solar respectivamente.

Las temperaturas superficiales T_{se} y T_{si} se miden con una cámara termográfica FLUKE TiR32 que opera en el rango -20°C – 150°C con una resolución térmica de 0.04°C a 30°C . Los detectores componen una matriz de plano focal de 320×240 pixeles. El equipo captura la radiación térmica emitida o reflejada por la superficie de los objetos en el rango 7.5 – $14 \mu\text{m}$ de longitud de onda, transforma proporcionalmente la energía recibida por cada pixel en intensidad, y da la correspondiente distribución de temperatura. Los errores se minimizan siguiendo el protocolo de medición usado por Marino et al. (2016), mejorando el sugerido por el fabricante. Se adquirieron y procesaron unas 200 imágenes diarias del exterior e interior del edificio durante dos semanas en primavera (19–30 octubre

2015), otoño (29 marzo – 7 abril 2016), invierno (4–15 julio 2016) y verano (29 noviembre – 7 diciembre 2016) a la mañana (8:00-9:00h), al mediodía (12:00-13:00h) y al atardecer (19:00-20:00h).

Las temperaturas T_i se determinan promediando los registros de dos sensores HOBO U12 instalados en la planta baja y otros dos en la planta alta que miden cada 10 min con una precisión de $\pm 0.35^\circ\text{C}$ y resolución de 0.03°C a 25°C . Estas mediciones convalidan que T_{si} es aproximadamente constante durante todo el año. La temperatura T_e y la radiación solar I_T se miden en una estación meteorológica ubicada a 200 m del edificio. La medición de I_T se hace con un radiómetro CNR2 *Campbell Scientific* diseñado para medir la radiación horizontal neta, distinguiendo entre la radiación infrarroja de onda larga y la radiación de onda corta. Los valores de T_e registrados durante 2016 se representan en la Figura 1 mostrando a T_e como una sucesión de variaciones rápidas (fluctuaciones) diarias (línea negra). La evolución de los valores medios muestra las variaciones lentas o estacionales de T_e .

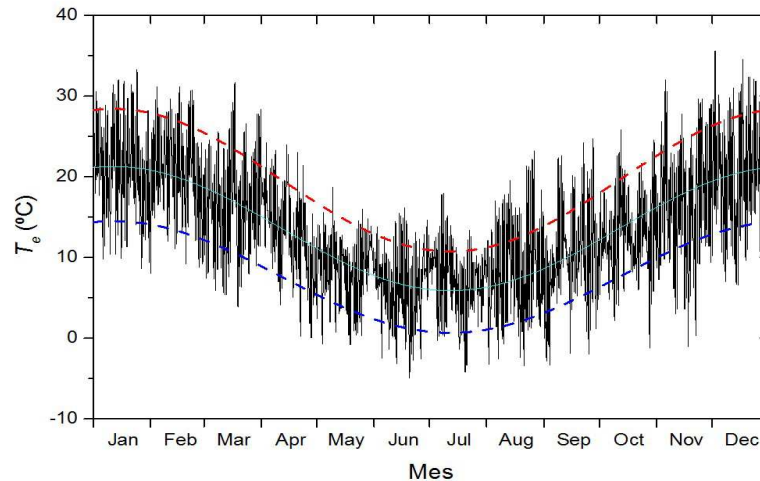


Figura 1: Valores de la temperatura externa T_e (línea negra) registrada durante 2016, junto con sus valores medios T_{em} (línea celeste), medio de los máximos T_{emax} (línea roja) y medio de los mínimos T_{emin} (línea azul).

Descomposición de la radiación medida en directa y difusa

Los radiómetros de las estaciones meteorológicas miden la radiación global incidente sobre una superficie horizontal. Para una superficie inclinada con respecto a la horizontal, la importancia relativa de las componentes de la radiación directa, la difusa y la reflejada por el suelo, cambia haciéndose necesario obtener no sólo el valor de la radiación global sino el de cada una de estas componentes. La forma más sencilla de estimar las componentes de la radiación a partir de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas consiste en aplicar el modelo de Liu y Jordan (1960) que considera isotrópica a la radiación incidente. En Argentina los modelos anisotrópicos mostraron un mejor desempeño (Denegri et al., 2012) si bien no hay un único modelo de este tipo que se destaque.

En el modelo de Liu y Jordan (1960), la variación anual de la radiación solar fuera de la atmósfera se aproxima en la forma $I_{ext} = C_s (1 + 0.034 \cos(360n/365))$, donde $C_s = 1367 \text{ W/m}^2$ es la constante solar y n es el número de día del año. La radiación fuera de la atmósfera que incide sobre una superficie inclinada un ángulo $(90^\circ - \beta)$ con respecto a la dirección de los haces incidentes es $I^* = I_{ext} \sin \beta$, con β : altitud solar. La relación entre la radiación solar medida I_{med} en la superficie terrestre e I^* define el índice de claridad $K = I_{med} / I^*$. Como los radiómetros se disponen horizontalmente, I_{med} se compone de la radiación directa y la difusa, es decir, $I_{med} = I_{dir} + I_{dif}$. El modelo propone:

$$\frac{I_{dif}}{I_{med}} = \begin{cases} 1 - 0.09K & K \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.160K + 4.388K^2 - 16.638K^3 + 12.336K^4 & 0.22 < K < 0.8 \\ 0.175 & 0.8 \leq K \end{cases} \quad (6)$$

Esta ecuación expresa implícitamente la aproximación isotrópica según la cual la radiación difusa incide sobre las superficies con igual intensidad e independientemente de la ubicación del sol en el firmamento. Para una superficie con una dada inclinación Σ respecto de la horizontal y ángulo θ con respecto a los haces incidentes, la radiación total se obtiene como sigue:

$$I_T = I_{dir} + I_{dif} + I_{ref} \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (7)$$

Donde: $I_{dir} = (\cos \theta / \sin \beta) I_{med}$, $I_{dif} = \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) I_{med}$, $I_{ref} = \rho \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) I_{med}$,

con $\theta = \cos^{-1}(\cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma)$, $\gamma =$ azimut solar para muros orientados al S y $\gamma =$ azimut solar + 180° para muros orientados al N (Marino et al., 2018). Notar que para muros verticales ($\Sigma = 90^\circ$), I_{dif} es la mitad de la correspondiente a una superficie horizontal ($\Sigma = 0^\circ$) puesto que el muro se encuentra expuesto a la mitad del ángulo sólido.

La Figura 2 muestra los registros de I_{med} y los valores de I_T calculados usando la Ec. (7) para muros orientados al N y al S. Observar que los máximos y mínimos de I_{med} que se obtienen al comienzo del verano y del invierno respectivamente no tienen su correlato en la variación de los correspondientes a I_T incidente sobre el muro vertical orientado al N. Esto se explica por el ángulo de incidencia θ de los rayos solares sobre una pared vertical en el sitio de la construcción. Para una pared enfrentada al N en la latitud 37.32°S, la radiación solar directa incide casi tangencialmente en verano, de modo que su contribución es mínima. Por el contrario, la radiación solar incide casi perpendicularmente en los mediodías de invierno y todos los tipos de irradiación indicados en la Ec. (7) contribuyen a I_T . Para un muro orientado al S, las contribuciones que cuentan son I_{dif} e I_{ref} , y en consecuencia I_T es menor durante todo el año respecto de lo que ocurre con los muros enfrentados N.

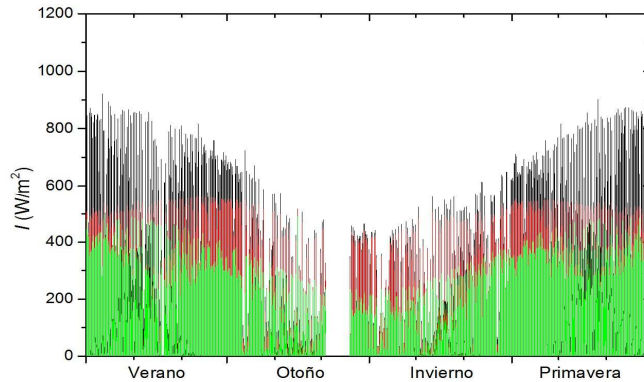


Figura 2: Irradiación solar medida por la estación meteorológica correspondiente a una superficie horizontal (línea negra), y las incidentes (calculadas con Ec. 7) sobre muros orientados al N (línea roja) y al S (línea verde). El intervalo donde no hay valores corresponde a una falla del radiómetro.

Obtención de T_{se} para tiempos distintos a los de medición

La TTIR proporciona los valores de T_{se} para tiempos determinados implicando que los valores de T_m y T_v obtenidos a partir de ellos sean definidos con una incerteza importante. Este problema se soluciona calculando teóricamente valores complementarios siguiendo el procedimiento usado por Marino et al. (2018). Para esto, debe observarse que T_{se} depende de T_e , I_T , R_{se} y q_{se} . Los valores de I_T se estiman a partir de los datos de localización del edificio, la orientación del muro y la posición del sol aplicando el método de Liu-Jordan. La determinación del flujo q_{se} requiere resolver la ecuación (de difusión) del calor en todo el espesor del muro considerando el efecto de la radiación solar sobre la envolvente por medio de la temperatura equivalente sol-aire ($T_{sol-aire}$). Esta es la temperatura del aire exterior para la que, en ausencia de radiación, el ambiente externo entrega el mismo flujo de calor a la superficie. La ecuación se resuelve numéricamente para el muro de interés con las condiciones de contorno $T_{sol-aire} = T_{sol-aire}(t)$ y $T_i = T_i(t)$. Como resultado se obtiene la evolución de la temperatura T en todo el dominio

simulado y, en particular, $T_{se}(t)$. La obtención de $T_{se}(t)$ y $q_{si}(t)$ de esta forma tiene la ventaja de compensar los errores estadísticos de las mediciones in-situ.

Validación de la metodología propuesta

Una vez hallada $T_{se}(t)$, se determina $(T_{se} - T_{si}) = \Delta T_m + T_v$ donde ΔT_m representa el valor medio de $(T_{se} - T_{si})$ en un intervalo temporal de por lo menos 4 días, el valor medio de q_{ss} y la amplitud q_v de las variaciones de q_T . El principio de superposición usado relaciona q_{ss} con ΔT_m , y q_v con T_v . Las Figs. 3 y 4 muestran las relaciones entre los valores de cada uno hallados en forma independiente a partir de los resultados numéricos. La Fig. 3 muestra que q_{ss} es proporcional a ΔT_m con pendiente K_T revelando que el intervalo temporal empleado para encontrar los valores medios es adecuado para aplicar dicho principio de superposición. La Fig. 4 muestra que un aumento de T_v corresponde a una disminución de q_v , hecho que se explica por el desfase (Tabla 1) existente entre ambas variables. Por otra parte, si T_v y q_v fuesen funciones senoidales exactas y desfasadas, la representación de una de estas variables en función de la otra mostraría elipses inclinadas (i.e, curvas de Lissajous) como puede inferirse en la Fig. 4 para cada intervalo quincenal. La dispersión de los puntos observada en esta figura muestra que las funciones senoidales son sólo una aproximación de las variaciones registradas, lo cual se manifiesta también en las Figuras 5 y 7.

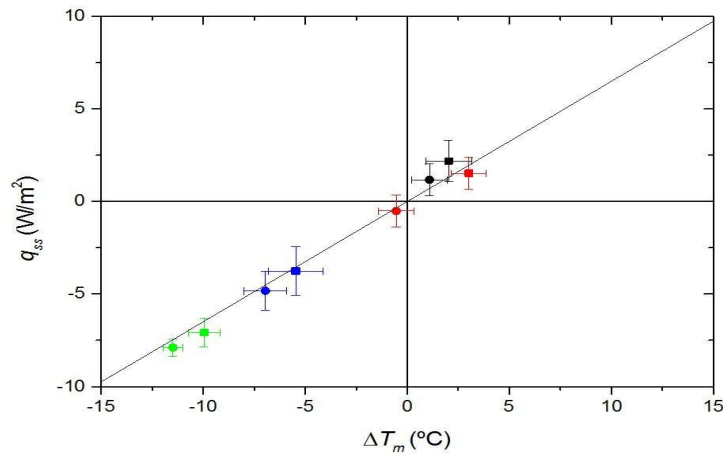


Figura 3: Flujo de calor en estado estacionario en función de la diferencia de temperatura superficial media en verano (negro), otoño (rojo), invierno (verde) y primavera (azul) para muros orientados al N (■) y al S (●). La recta corresponde a la Ec. (5).

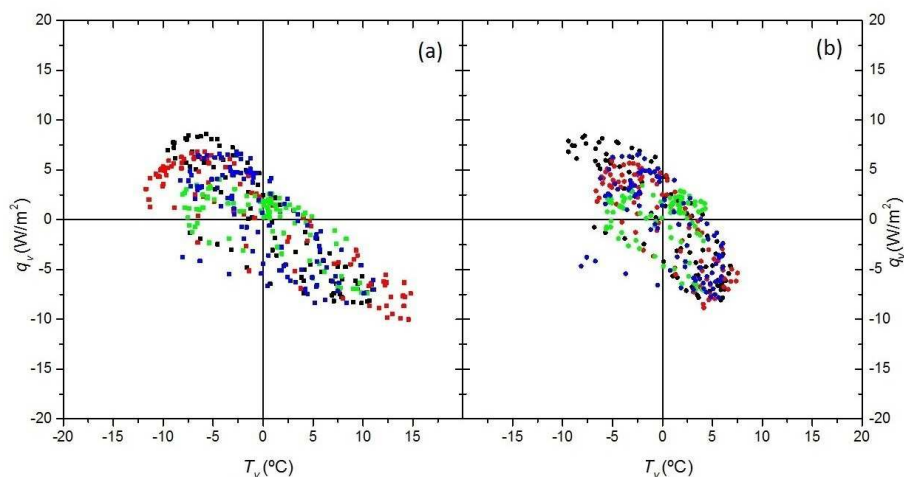


Figura 4: Flujo de calor variable en función de la diferencia de temperatura superficial en verano (negro), otoño (rojo), invierno (verde) y primavera (azul) para muros orientados al (a) N y (b) S.

RESULTADOS

En cada intervalo quincenal analizado, se seleccionaron las mediciones realizadas los días con

condiciones climáticas estables (velocidad del viento < 5 m/s), sin formación de neblina, y con máximos y mínimos de T_e similares durante al menos 4 días consecutivos. La Fig. 5 muestra la evolución de T_{se} correspondiente al muro orientado al N para las diferentes estaciones del año, junto con las respectivas curvas de mejor ajuste de la forma $T_m + T_v \sin \omega(t - \tau_{T_{se}})$. Se observa que los dos primeros términos de la Ec. (4) proporcionan una aproximación razonable al cálculo del valor medio y la amplitud de las variaciones de T_{se} . Luego, de este ajuste se obtienen T_m , T_v y $\tau_{T_{se}}$ para cada intervalo analizado, los que se muestran en la forma $T_m \pm T_v$ en la Fig. 6. T_m es siempre mayor que la temperatura media exterior T_{em} (línea celeste en Fig. 1), incluso en invierno (punto verde en Fig. 6), debido a la contribución de la radiación. Tanto T_m como T_v alcanzan máximos en el intervalo de medición establecido al comienzo del otoño. En este intervalo T_e es menor que en el verano, aunque la radiación incidente genera un calentamiento mayor de los muros orientados al N debido a la más importante contribución de la radiación solar directa. El efecto neto es el aumento de T_m (línea roja horizontal respecto de la línea negra en Fig. 5) y, también, de la amplitud de las fluctuaciones de T_{se} (mayor amplitud de la senoide roja respecto de la negra). Los mínimos de T_m y T_v se alcanzan en

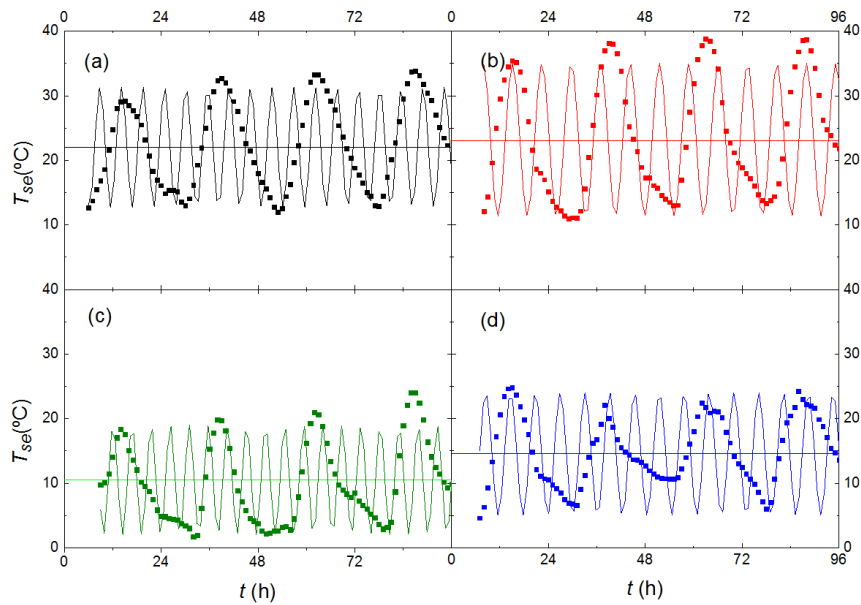


Figura 5: Evolución de la temperatura superficial de la cara externa del muro orientado al N (símbolos) en (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera. Las líneas continuas representan las respectivas funciones seno de mejor ajuste a los puntos experimentales con ordenada al origen (T_m) indicada con las líneas horizontales.

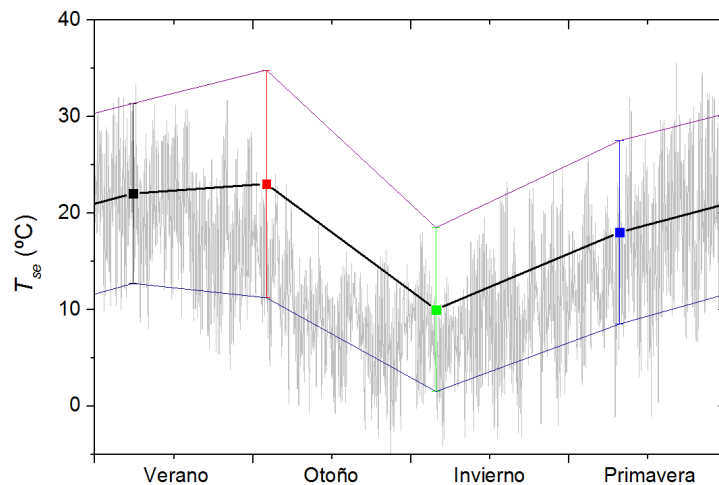


Figura 6: Valores medios (puntos) y amplitud (líneas verticales) de las oscilaciones de T_{se} correspondientes a los muros orientados al N para los intervalos analizados. La curva correspondiente a T_e (gris claro), mostrada en Fig. 1, se incluye para comparación.

invierno (líneas verdes), como es de esperar, ya que tanto la temperatura como la radiación incidente son mínimas. Para los muros orientados al S (Figs. 7 y 8) los valores medios y las amplitudes de las oscilaciones se reducen respecto aquellos correspondientes a los orientados al N como consecuencia de la ausencia de radiación solar directa. Los valores medios de T_{se} se acercan más a los valores medios de T_e , mientras que las amplitudes se acercan a la media de las oscilaciones diarias de T_e .

Para cada valor de ΔT_m se calcula el correspondiente valor de q_{ss} usando la Ec. (5) y $T_{si} = 20^\circ\text{C}$, mientras que con T_v se obtiene q_{si0} usando la Ec. (3). Los resultados se resumen en la Tabla 2 que incluye los valores de q_{ss} (3^{ra} columna) y q_v (4^{ta} columna) obtenidos a partir de $\Delta T_m = T_{em} - T_{si}$ y $T_v = (T_{e\max} - T_{e\min})/2$, donde T_{em} , T_{emax} y T_{emin} son los valores medios, los medios de los máximos y los medios de los mínimos de T_e , respectivamente, para los intervalos temporales analizados.

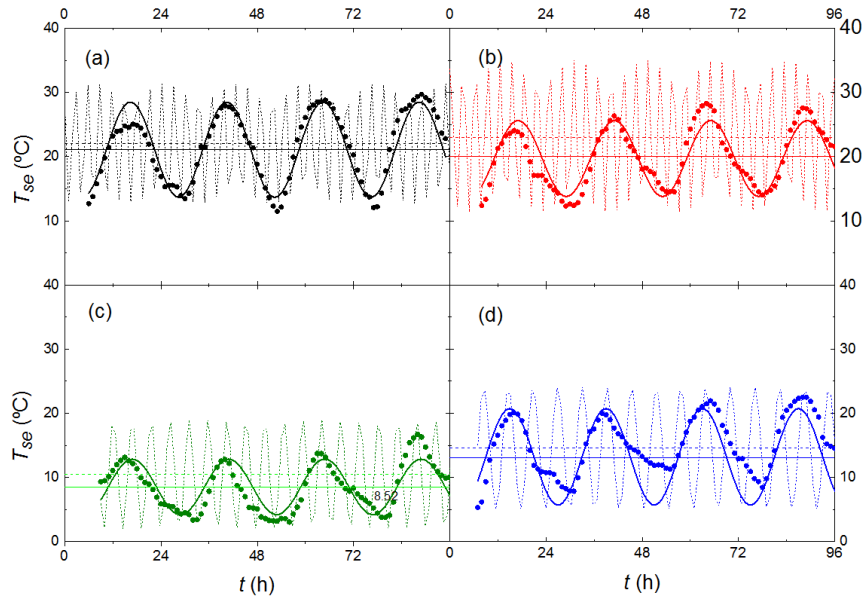


Figura 7: Temperatura superficial de la cara externa de los muros orientados al S en (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera. Las líneas continuas representan las respectivas funciones seno que mejor ajustan los puntos con la ordenada al origen (T_m) indicada con líneas continuas horizontales. Las líneas de trazos corresponden a resultados de los muros orientados al N (Fig. 5).

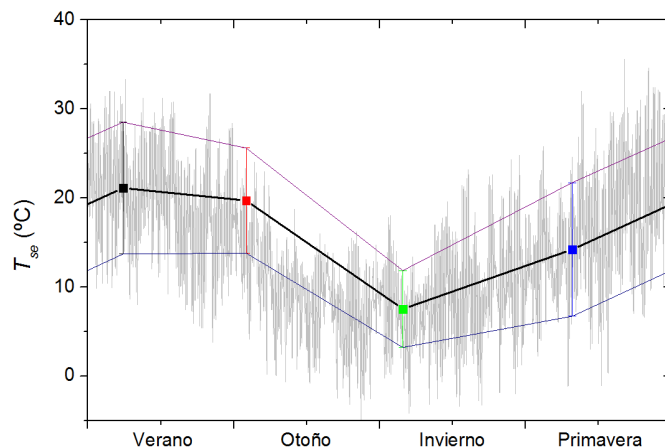


Figura 8: Valores medios y amplitud de las oscilaciones de T_{se} correspondientes a los muros orientados al S para los intervalos analizados. La curva correspondiente a T_e (gris claro), mostrada en Fig. 1, se incluye para comparación.

DISCUSIÓN

Con la metodología desarrollada es posible estimar que porción del flujo de calor por conducción a través de un muro sigue un régimen aproximadamente estacionario, y que porción es variable, a partir de mediciones de T_{se} y T_{si} realizadas con la TTIR. Puesto que $T_{si} \approx$ constante en un edificio con control de temperatura, se evalúan las variaciones de T_{se} . Para ello, los valores de T_{se} obtenidos se descomponen en un valor constante T_m y otro que varía periódicamente con amplitud T_v y $P = 24$ h. Los valores de T_m y T_v varían en las diferentes estaciones del año debido a la evolución de T_e y de la radiación solar recibida que es determinada por la orientación del muro, siendo T_m y T_v máximos para los muros orientados al N.

El cálculo de los flujos q_{ss} y q_v se realiza por separado gracias a la linealidad de las ecuaciones involucradas: la contribución estacionaria es proporcional a $\Delta T_m = T_{se} - T_{si}$ mientras que la contribución variable se relaciona con T_v . El empleo de T_{se} y T_{si} evita usar R_{se} y R_{si} en los cálculos. Así se obtiene $q_{ss} = \text{const}$ que depende de la transmitancia del componente constructivo considerado. La Tabla 2 muestra que la pérdida de energía entre los muros y el exterior en régimen estacionario es máxima en invierno y continua siendo importante hasta la primavera. En verano, el edificio gana calor alcanzando un máximo al comienzo del otoño especialmente a través de los muros orientados al N.

<i>Estación</i>	<i>Cálculos con metodología propuesta (W/m²)</i>		<i>Calculados con los valores medios, máximos y mínimos de T_e (W/m²)</i>		<i>Diferencia (%)</i>	
	<i>q_{ss}</i>	<i>q_v</i>	<i>q_{ss}</i>	<i>q_v</i>	<i>q_{ss}</i>	<i>q_v</i>
	<i>Muros orientados al N</i>					
<i>Verano</i>	2.2	3.3	-0.5	2.4	2.7	0.9
<i>Otoño</i>	1.5	4.2	-2.7	2.2	4.2	2.0
<i>Invierno</i>	-7.1	3.0	-8.0	1.8	0.9	1.2
<i>Primavera</i>	-3.8	3.4	-3.1	2.2	-0.7	1.2
	<i>Muros orientados al S</i>					
<i>Verano</i>	1.2	2.6	-0.5	2.4	1.7	0.3
<i>Otoño</i>	-0.5	3.6	-2.7	2.2	2.2	1.4
<i>Invierno</i>	-7.9	1.5	-8.0	1.8	0.1	-0.3
<i>Primavera</i>	-4.8	2.7	-3.1	2.2	-1.7	0.5

Tabla 2: Flujos de calor correspondientes a los regímenes estacionario y variable. Valores positivos (negativos) de q_{ss} indican que el calor ingresa al (sale del) edificio.

Cuando se comparan los cuatro primeros y los cuatro últimos valores de la primera columna de Tabla 2, se observa que los valores de q_{ss} para los muros orientados al N son ≈ 1 W/m² mayores que los correspondientes a los muros orientados al S. Esta es la contribución de la radiación directa al muro con las características constructivas y la locación del edificio evaluado. Las contribuciones de la radiación difusa y de la reflejada por el entorno se obtienen al comparar los valores de q_{ss} de la primera y tercera columnas; la diferencia entre ambos tipos de radiación se presenta en la quinta columna. El flujo q_v depende de las características dinámicas y la amplitud de las variaciones de T_{se} . Para esta componente del flujo total, el intercambio de energía entre los muros y el exterior es significativo al comienzo de otoño, menos importante en verano y primavera, y mínimo en invierno (segunda y cuarta columnas de Tabla 2). También q_v que atraviesa los muros orientados al N es mayor con respecto a los orientados al S. Esto implica la necesidad de considerar la contribución variable del flujo de calor por conducción en verano y otoño cuando se evalúa térmicamente el edificio, mientras que en invierno las pérdidas de calor se deben fundamentalmente a $q_{ss} \propto \Delta T_m$.

CONCLUSIONES

La TTIR ofrece valiosa información cuantitativa sobre la distribución de la temperatura superficial y con buena precisión. Además, esta información puede completarse con los valores teóricos tal como

describen Marino et al. (2018), evitando el trabajo de efectuar muchas mediciones diarias. Con los valores de T_{se} medidos durante varios días (y eventualmente T_{si} si hay variaciones significativas de T_i), es posible obtener el valor medio ΔT_m y la amplitud T_v de las oscilaciones diarias y, con estos valores, calcular q_{ss} y q_v , respectivamente. En consecuencia, puede determinarse la importancia relativa de q_{ss} debida a T_{em} y q_v resultante de las variaciones diurnas, a través de distintos tipos de muro y en diferentes locaciones. Una vez hallado el flujo de calor, una simple correlación lineal entre este y $(T_e - T_i)$ permite determinar el valor U del sector constructivo de la envolvente considerado y/o corroborar los valores de R_{se} y R_{si} como lo hicieron Thomas et al. (2014). Para los muros dobles requeridos por las normas técnicas para la ciudad de Tandil, q_v predomina en verano-otoño, y q_{ss} en invierno. En otros tipos de muros y/u otras localidades podrían obtenerse resultados diferentes.

La presente investigación constituye un paso importante en la evaluación global de las pérdidas y ganancias de calor de un edificio complejo. Proporciona una metodología para determinar la incidencia de la radiación solar y de las oscilaciones de la temperatura exterior sobre la carga térmica de los edificios, mejorando las metodologías preexistentes (como las que se utilizan en las normas IRAM) basadas únicamente en cálculos de q_{ss} . A pesar de la consistencia de los resultados obtenidos, la metodología implementada puede mejorarse. Por ejemplo, el uso de un modelo isotrópico de la radiación difusa puede reemplazarse por otros modelos más precisos (Denegri et al., 2012). Por otra parte, los resultados se basan en mediciones de T_{se} y T_{si} realizadas durante un par de semanas en cada estación del año, las cuales pueden corresponder a periodos con T_e , nubosidad y/u otros parámetros meteorológicos que se apartan de los valores típicos locales. Por lo tanto, el presente análisis podría profundizarse usando T_{em} , T_{emax} , T_{emin} e I_T correspondientes a todo el año, lo cual permitiría además aplicar en forma sencilla la metodología propuesta a otras regiones del país.

NOMENCLATURA

C_p	calor específico (J/kgK)
D	difusividad térmica (m^2/s)
I	irradiancia solar (W/m^2)
k	conductividad térmica ($W/m^\circ C$)
K	índice de claridad
ℓ	ancho de la pared (m)
P	periodo (días)
q	flujo de calor a través de una pared (W/m^2)
q_{ss}	flujo de calor en el estado estacionario (W/m^2)
q_v	flujo de calor variable (W/m^2)
R	resistencia térmica (m^2K/W)
t	time (h)
T	temperatura ($^\circ C$)
$T_{sol-air}$	temperatura equivalente sol-aire ($^\circ C$)
T_v	amplitud de las variaciones periódicas de T_{se} ($^\circ C$)
U	coeficiente de transferencia de calor total U ($W/m^2^\circ C$)
x	coordenada especial (m)
X	distribución espacial de temperatura
β	altitud solar ($^\circ$)
ρ	densidad (kg/m^3)
ω	frecuencia angular (1/día)
θ	ángulo de los haces incidentes respecto a la normal de la superficie ($^\circ$)
γ	azimut solar ($^\circ$)
Θ	distribución temporal de la temperatura
Σ	inclinación de los rayos incidentes respecto a la horizontal ($^\circ$)

Subíndices:

0	amplitud de una función periódica
s	valor sobre una superficie
e	valor en el exterior

<i>i</i>	valor interior
<i>m</i>	valor medio
<i>T</i>	valor total

REFERENCIAS

- Denegri M.J., Raichijk C. y Gallegos H.G. (2012). Evaluación de diferentes modelos utilizados para la estimación de la radiación fotosintéticamente activa en planos inclinados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16, 11.9-15.
- Ibarra M.C. (2012). La ecuación del calor de Fourier: Resolución mediante métodos de análisis en variable real y en variable compleja. *Memorias II Jornadas de investigación en ingeniería del NEA y países limítrofes*. Resistencia, Argentina. ISBN: 978-950-42-0142-7.
- Karmele U.M. y Davies M.G. (2008). One-dimensional solutions to Fourier's equation and measurements of heat transmission through walls: The role of wall decay times. *Building and Environment* 43, 1433-1445.
- Liu B.Y.H. y Jordan R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 4 (3), 1-19.
- Marino B.M., Muñoz N. y Thomas L.P. (2016). Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography. *Applied Thermal Engineering* 114, 1213-1221.
- Marino B.M., Thomas L.P. y Muñoz N. (2018) *Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects*. *Energy and Buildings* 174, 452-463.
- Muñoz N., Thomas L.P. y Marino B.M. (2015). Comportamiento térmico dinámico de muros típicos empleando el método de la admitancia. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 36, 31-39.
- Muscio A. y Akbari H. (2017). An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation. *Energy and Buildings* 157, 184-194.
- Pipes L.A. (1957). Matrix analysis of heat transfer problems. *Journal of Franklin Institute* 623, 195-206.
- Roberz F., Loonen R. C. G. M., Hoes P. y Hensen J. L. M (2017). Ultra-lightweight concrete: energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. *Energy and Buildings* 138, 432-442.
- Sahu M., Bhattacharjee B. y Kaushik S.C. (2012). Thermal design of air-conditioned building for tropical climate using admittance method and genetic algorithm. *Energy and Buildings* 53, 1-6.
- Saboor S. y Ashok Babu T.P. (2015a). Optimizing the position of insulating materials in flat roofs exposed to sunshine to gain minimum heat into buildings under periodic heat transfer conditions. *Environ Sci. Pollut. Res.* Disponible online en <http://doi.org/10.1007/s11356-015-5316-7>.
- Saboor S. y Ashok Babu T. P. (2015b). Effect of air space thickness within the external walls on the Dynamic thermal behaviour of building envelopes for energy efficient building construction. *Energy Procedia* 79, 766 – 771.
- Thomas L.P., Marino B.M. y Muñoz N. (2014). Cuantificación de las resistencias térmicas superficiales y pérdidas de calor por conducción en edificios aplicando termografía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 18, 05.55-05.64.
- Thomas G.E., Muñoz N., Marino B.M., Thomas L.P. (2018) Respuesta dinámica de los muros de la envolvente edilicia a variaciones diurnas de la temperatura exterior. *Anales AFA* 29, 20-28.

ABSTRACT

The outdoor air temperature depends on the building's location and has periodic variations resulting from seasonal, daily and random meteorological changes. The former are so slow that the heat flux by conduction through the envelope walls can be considered steady while the second impose a more complex heat transfer dynamics. This study provides a methodology that relates the steady-state heat flux and the heat flux associated with the dynamic response of the envelope to mean values and daily outdoor temperature variations, respectively, including the solar radiation effects. The technique is based on in situ measurements, employs the surface temperatures of both sides of the envelope, and is applied to evaluate the thermal behaviour of a typical building located in the centre of Buenos Aires Province.

Keywords: heat transfer, non-steady state, surface temperatures, actual use conditions.