

CUANTIFICACIÓN DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS SUPERFICIALES Y PÉRDIDAS DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN EDIFICIOS APLICANDO TERMOGRAFÍA

L.P. Thomas¹, B.M. Marino¹, N. Muñoz Vásquez²

Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales

Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la 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

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

Recibido 17/08/14, aceptado 29/09/14

RESUMEN: La termografía infrarroja es una herramienta fundamental en estudios cualitativos de eficiencia energética, detección de problemas de humedad y pérdidas de calor en edificios, y su uso es cada vez más frecuente. Aquí se la emplea para obtener las temperaturas superficiales, interna y externa, de las fachadas de un edificio como parte de una metodología aplicada para cuantificar las pérdidas de calor por conducción a través de la envolvente, aprovechando que el aire es transparente a la radiación infrarroja emitida por las superficies. Se encuentra que la resistencia térmica de las capas límites superficiales en los vidrios y muros es similar a las de los materiales, reduciendo significativamente la conductividad térmica efectiva de la envolvente en la construcción evaluada. Los resultados muestran la importancia de determinar cuantitativamente el flujo de calor en el lugar de emplazamiento de las edificaciones.

Palabras clave: termografía infrarroja, pérdidas de calor, resistencia térmica superficial, mediciones cuantitativas, condiciones reales de uso.

INTRODUCCIÓN

Según una publicación del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI, 2005), aproximadamente un tercio de la energía producida en Argentina es consumida en la gestión de los edificios. De esta cantidad, casi la mitad se utiliza para satisfacer la demanda de calefacción y refrigeración, mientras más del 30% del resto se pierde por los techos con deficiente aislación térmica y por ello proclives a fugas de calor en invierno o sobrecalentamiento en verano. Mundialmente, alrededor del 34% del consumo total de energía involucra las actividades humanas relacionadas con las edificaciones incluyendo el empleo de aparatos eléctricos e iluminación. Este gasto energético contribuye en 25-30% a las emisiones de CO₂, que representa el 19-22% de todas las emisiones y el 10-12% de la contribución humana al cambio climático por el calor retenido en la atmósfera.

En este contexto, la detección y cuantificación de las pérdidas a través de la envolvente edilicia adquiere especial relevancia. En Argentina estas pueden estimarse utilizando las normas IRAM N° 11549, 11601, 11603, 11604, 11605, 11625, 11630, 11507-1 y 11507-4 relacionadas con el acondicionamiento térmico de edificios y, en particular en la Provincia de Buenos Aires, contempladas en la Ley 13059 de cumplimiento obligatorio para construcciones nuevas y remodelaciones de más del 50% de la superficie, para todo edificio de uso público o privado (IVBA, 2014; Lanzetti 2014), siguiendo los métodos allí establecidos para el cálculo de los valores normalizados de las resistencias térmicas de los materiales y de la capa de aire próxima a la superficie. Si bien tales valores de los parámetros edilicios son adecuados para estimaciones previas a las etapas de construcción, éstos pueden cambiar debido a las características intrínsecas del diseño, variedad y actualización de materiales ofrecidos, envejecimiento, características geográficas, etc. En el caso de edificios antiguos, el estudio energético se complica por la carencia de información sobre ellos implicando la necesaria determinación del flujo de calor entre los ambientes y con el exterior.

Por su parte, la facilidad y rapidez de las mediciones realizadas con cámaras termográficas, en áreas inaccesibles y sin contacto con las superficies hace de la termografía una técnica muy requerida en campos como el de la construcción e inspecciones de instalaciones eléctricas (Avdelidis y Moropoulou, 2004; Sandrolini y Franzoni, 2006; Lindquist y Bertling, 2008; Balaras y Argirou, 2002), en ambientes industriales (Chrysochoos et al., 2008; McMullan, 1990) y en objetos de difícil acceso (Clark, 2003), aunque también en medicina y veterinaria (Keyserling et al., 2000; McCafferty, 2007). Acompañando las técnicas tradicionales de monitoreo de edificios, se constituye en una valiosa herramienta para detectar defectos en la envolvente, puentes térmicos, infiltraciones o fugas de aire y manchas de humedad (Sanglier, 2003; Martín et al., 2004; Rosina y Spodek, 2009). Como complemento de las auditorías térmico-energéticas, es particularmente importante para evaluar el confort térmico a través de la medición de temperaturas superficiales de muros, pisos y techos. Aprovechando estas propiedades, Flores Larsen y Hongn (2012) presentaron aplicaciones cualitativas de la termografía infrarroja nocturna en construcciones de la ciudad de Salta durante el invierno, describieron las posibles fuentes de error más comunes de los termogramas y analizaron su efecto sobre las medidas cuantitativas. También Alías et al. (2013) reportaron resultados de la aplicación cualitativa de la termografía como complemento de una evaluación de desempeño higrotérmico-energético realizada en el edificio de la FAU-UNNE (Campus UNNE de la ciudad de Resistencia, Chaco) durante periodos de verano e

¹Profesor Asociado DE UNCPBA, Investigador del CONICET

²Becaria ANPCyT

invierno, especialmente en la detección de puntos, áreas y cuestiones críticas (puentes térmicos, filtraciones de humedad, incidencia del asoleamiento y de los colores de las distintas superficies de la envolvente constructiva, entre otros).

No obstante, si bien se han registrado notables avances en la construcción de las cámaras infrarrojas y en el análisis de las imágenes obtenidas, los estudios termográficos presentan limitaciones como, por ejemplo, las provocadas por la distorsión de las lentes termográficas que no permite obtener registros de temperatura georeferenciados ni mapear las termografías con isotermas de los objetos analizados. Además, la necesidad de conocer con exactitud la emisividad de la superficie analizada y de contar con un adecuado control de las condiciones de trabajo (temperatura y humedad del aire, viento, evitando el sol directo, sin lluvia reciente, etc.) pueden conducir a lograr medidas imprecisas de temperatura. Menos se ha avanzado en el empleo de estos instrumentos para los estudios cuantitativos ya que requieren un cuidado especial en factores determinantes para obtener la temperatura superficial en las imágenes como son la emisividad, la transmisión atmosférica, la temperatura ambiente y la reflexión o absorción de fuentes de calor naturales y artificiales que rodean la superficie de interés, además de una adecuada calibración de la cámara antes de tomar las imágenes. Al presente, sólo unos pocos trabajos reportan resultados de evaluaciones cuantitativas del flujo de calor a través de la envolvente usando registros termográficos (Goldstein, 1978; Mack, 1985; Grinzato, 1990; Grinzato et al., 1998).

Por otro lado, se sabe que el nivel de aislación térmica resultante de una construcción es establecido por las resistencias de los materiales empleados en las edificaciones, pero también por las resistencias térmicas superficiales que pueden variar significativamente de una edificación a otra. La importancia del cálculo de estas últimas ha sido subestimada respecto de otros efectos como, por ejemplo, el de los parasoles y entrantes en las fachadas para reducir la incidencia de la luz solar en verano sin perderla en invierno (Ledesma et al., 2004). Esto se debe, probablemente, a lo complejo que resulta estimar las resistencias térmicas superficiales ya que dependen no sólo de las diferencias de temperatura y humedad, sino del viento, la forma de la envolvente, el entorno, etc. En este trabajo mostramos que es posible determinar las resistencias térmicas superficiales y cuantificar las pérdidas de calor por conducción a través de la envolvente con las mediciones de las temperaturas superficiales internas y externas de las fachadas obtenidas con una cámara termográfica, junto con las temperaturas del ambiente interior y del aire exterior. La metodología es aplicada al edificio inaugurado en noviembre de 2013 de la Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA).

CONSIDERACIONES TEÓRICAS

La radiación hace posible la transferencia de energía entre una superficie y su entorno, mediante la absorción, reflexión y emisión de dicha energía por medio de ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y convección del calor que necesitan un medio para transportar energía, la radiación se transmite a través del vacío o atravesando el aire con poca atenuación. La radiación emitida por un cuerpo depende del tipo y temperatura T de la superficie. De interés aquí son la radiación visible y la infrarroja cercana emitidas por el sol y luminarias, y la infrarroja lejana emitida por los cuerpos a temperatura ambiente, a veces denominadas radiación térmica de “onda corta” y “onda larga”, respectivamente. La primera tiene longitudes de onda λ entre 0.2 y $3\mu\text{m}$, característica de las fuentes de alta temperatura ($T > 3000\text{K}$) e incluye parte del espectro ultravioleta ($\lambda < 0.38\mu\text{m}$), el visible ($0.38 < \lambda < 0.78\mu\text{m}$) y el infrarrojo cercano ($0.78 < \lambda < 3\mu\text{m}$). La radiación térmica de onda larga abarca el infrarrojo lejano con $3 < \lambda < 50\mu\text{m}$, y es característica de fuentes de radiación a temperatura ambiente ($T \sim 300\text{K}$). Ambas son absorbidas en parte por los materiales que nos rodean, pero la segunda también es parcialmente emitida.

El coeficiente de absorción, o absorbancia α , es la fracción de la radiación incidente retenida en la superficie, mientras que el resto es reflejada (reflectancia r) y/o transmitida (transmitancia τ) si la superficie es parcialmente transparente. En una situación estacionaria, la conservación de la energía implica que $\alpha + r + \tau = 1$. La radiación absorbida depende de λ , calienta el material próximo a la superficie por conducción, se disipa en el aire en contacto con la superficie por convección, o se reenvía al exterior como radiación infrarroja. La absorbancia α_c de la radiación térmica de onda corta es característica de cada material y se encuentra en el rango 0.1-0.95, mientras que la de onda larga α_l tiene el mismo valor que la emitancia ε .

Una forma frecuente de definir a las superficies es aquella por la cual son reflectoras si $\alpha_c, \tau < 20\text{-}25\%$ y tienen un comportamiento similar al de los “cuerpos negros” si $\alpha_c, \varepsilon > 80\text{-}85\%$. Alternativamente, los materiales pueden clasificarse de acuerdo a su albedo, o fracción de radiación reflejada respecto a la radiación incidente. Así, las superficies reflectoras tienen un valor alto de albedo ($> 0.80\text{-}0.85$) mientras que para los “cuerpos negros” es bajo ($< 0.20\text{-}0.25$). Ambas clasificaciones están relacionadas cuando se aplican a los cuerpos opacos ($\tau \sim 0$) para los que a un valor alto de r corresponde un valor bajo de α , y viceversa. Debe notarse que el albedo se refiere al promedio de la intensidad de la radiación en un rango de longitudes de onda, normalmente el de la luz visible. Para las edificaciones, sin embargo, conviene hacer un análisis más detallado entre la radiación visible y la infrarroja cercana para la radiación incidente, y entre la radiación visible y el infrarrojo lejano para la reflejada. Como consecuencia, es posible diferenciar las superficies selectivas calientes ($\alpha_c > 80\text{-}85\%$, $\varepsilon < 20\text{-}25\%$) y frías ($\alpha_c < 20\text{-}25\%$, $\varepsilon > 80\text{-}85\%$), además de las reflectoras y las que se comportan como “cuerpos negros”.

La mayoría de los materiales usados en construcciones son opacos a la radiación infrarroja, es decir que para ellos $\tau \approx 0$, de manera que $\alpha + r \approx 100\%$. Además, predominan las superficies con alta emisividad (cal, pintura blanca, ladrillo rojo) con $\varepsilon \approx 0.9\text{-}0.95$. Las superficies vidriadas comunes también son opacas a la radiación infrarroja lejana ($\lambda > 3\mu\text{m}$) y tienen una alta emitancia con valores similares a los mencionados, además de sus conocidas transparencia a la radiación visible y reflexión especular. Esto importa especialmente para realizar mediciones con la cámara termográfica.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

El edificio analizado se encuentra en la zona semi-rural de Tandil ($37^{\circ}19'S$ - $59^{\circ}08'O$), ciudad del centro-este bonaerense

caracterizado por su clima templado y húmedo, con veranos suaves (subhúmedo serrano) y poca amplitud térmica durante todo el año. Los valores típicos para Tandil según la norma IRAM 11603 de *Clasificación bio-ambiental de la República Argentina* se resumen en la Tabla 1, correspondiente a la zona IV(c) de clima templado frío de transición (Czajkowski y Rosenfeld, 1992). De acuerdo con esta clasificación, se recomienda el diseño de las 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 que supere el 15%. Debido a la alta nubosidad registrada en la zona, no se cuenta con un recurso solar significativo.

Símbolo	Nombre	Verano (Ene-Feb)	Invierno (Jun-Jul)
TMXA	Temperatura máxima absoluta (°C)	37.2	23.8
TMAX	Temperatura máxima media (°C)	26.9	12.8
TMED	Temperatura media (°C)	20	7.5
THUM	Temperatura húmeda (°C)	16.5	6.2
TMIN	Temperatura mínima media (°C)	13.3	3.1
TMNA	Temperatura mínima absoluta (°C)	2.2	-7.1
TROC	Temperatura de rocío (°C)	13.9	4.6
TVAP	Presión parcial del vapor de agua (hPa)	16.4	8.8
TDMN	Temperatura de diseño mínima (°C)	8.8	-1.4
TDMX	Temperatura de diseño máxima (°C)	30.4	16.3
HR	Humedad relativa (%)	71	83.5
VV	Velocidad media del viento (km/h)	14	14
PREP	Precipitación media (mm)	102.5	55.5
NUB	Nubosidad	3.6	4.6
CLA	Días cielo claro	9.5	6
CUB	Días con cielo cubierto	5.5	11
PRE	Días con precipitación	7.5	6.5
GRA	Días con granizo	0.05	0
NEV	Días con nevadas	0	0.1
NIE	Días de niebla	5	8
HEL	Días con heladas	0	8
TOR	Días de tormenta	4.5	1.5
HEF	Heliofania efectiva	8.3	4.1
HRE	Heliofania relativa	59	41
PRAT	Presión atmosférica (hPa)	991.1	995.1
GDC18	Grados-día de calefacción base 18°C	0	307.5
GDC20	Grados-día de calefacción base 20°C	5	368.5
GDC22	Grados-día de calefacción base 22°C	55.5	429.5

Tabla 1: Valores característicos de parámetros meteorológicos en Tandil (Buenos Aires) según norma IRAM 11603.

Se tomaron imágenes termográficas de las fachadas del edificio mostrado en la Fig. 1 con el objetivo de determinar las temperaturas superficiales. Para ello se utilizó una cámara termográfica FLUKE TiR32, con detector con matriz de plano focal de 320x240 pixeles basada en microbolómetro no refrigerado. Su sensibilidad térmica (NETD) es $\leq 0.04^{\circ}\text{C}$ a 30°C , con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o 2% y rango de temperatura de -20°C a 150°C . Captura la radiación térmica emitida o reflejada por la superficie de los objetos comprendida en el rango $7.5 < \lambda < 14\mu\text{m}$, es decir en el máximo de emisión de los cuerpos a temperatura ambiente, y la transforma en imágenes luminosas donde cada pixel se asocia con un valor proporcional a la cantidad de energía recibida, y con ella se puede determinar la distribución de temperatura correspondiente. La emisividad y la compensación de la temperatura reflejada de fondo se mantienen constantes en 0.95 y 20°C respectivamente, valores coincidentes con los recomendados en la *Guía de la termografía infrarroja* (Melgosa Revillas, 2011) y validados en el laboratorio siguiendo la metodología allí sugerida. Para evitar el efecto de reflectividad sobre los resultados, se trabajó con distintos ángulos en los casos de las superficies vidriadas. Algunas mediciones se corroboraron con un termómetro digital *Smartmeter* y termo-resistencia tipo PT-100 clase 1/3 que mide con una precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Los espesores de los cerramientos y las distancias cámara – superficie se obtuvieron empleando un medidor laser FLUKE 414D con precisión de 1mm; también se verificaron las dimensiones indicadas en los planos de la construcción. Luego de una evaluación cualitativa de las imágenes tomadas de las cuatro fachadas del edificio, las mediciones se focalizaron en las fachadas frontal y lateral izquierda. Si bien se realizaron dos series de medidas entre los días 9 y 16 de junio, y entre el 8 y 16 de julio (invierno) entre las horas 7:00 y 8:00, 13:00 y 14:00, 17:00 y 18:00, los valores reportados en este trabajo como representativos corresponden a los días 16 de junio y 14 y 16 de julio, por razones de brevedad.

Las cuatro fachadas de la envolvente presentan 6 tipos de componentes arquitectónicos que se repiten y que combinan mampostería y ventanales. La ubicación de los mismos para la planta baja (PB) se indica en la Fig. 2 mientras fotografías de algunos de estos sectores se muestran en la Fig. 3. Todas las superficies vidriadas están confeccionadas con doble vidrio hermético de espesores 0.020, 0.024 y 0.028m, implicando transmitancias térmicas $K = 3.20, 3.20$ y $2.8\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, respectivamente. La mampostería consiste en muros dobles contruidos por una capa de ladrillo visto de 0.12m, placa de poliestireno expandido de 0.035m, azotado hidrófugo, ladrillo hueco de 0.12m y revoques grueso y fino en el interior, cumpliendo con la normativa vigente para la zona. Todos los muros de la envolvente tienen 0.30m de espesor y $K = 0.72\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ calculada según el procedimiento indicado en la norma IRAM 11601 sin considerar las resistencias superficiales. El cálculo reportado en este trabajo involucra a las superficies verticales planas que conforman la envolvente. El comportamiento térmico de los marcos de aluminio de los paneles vidriados, los sectores cilíndricos en las esquinas y

aquellos que contienen las calderas, el techo y el piso tienen características especiales por lo que la estimación de sus contribuciones al flujo total de calor serán objeto de otro trabajo.



Figura 1: Vista al noroeste del edificio evaluado.

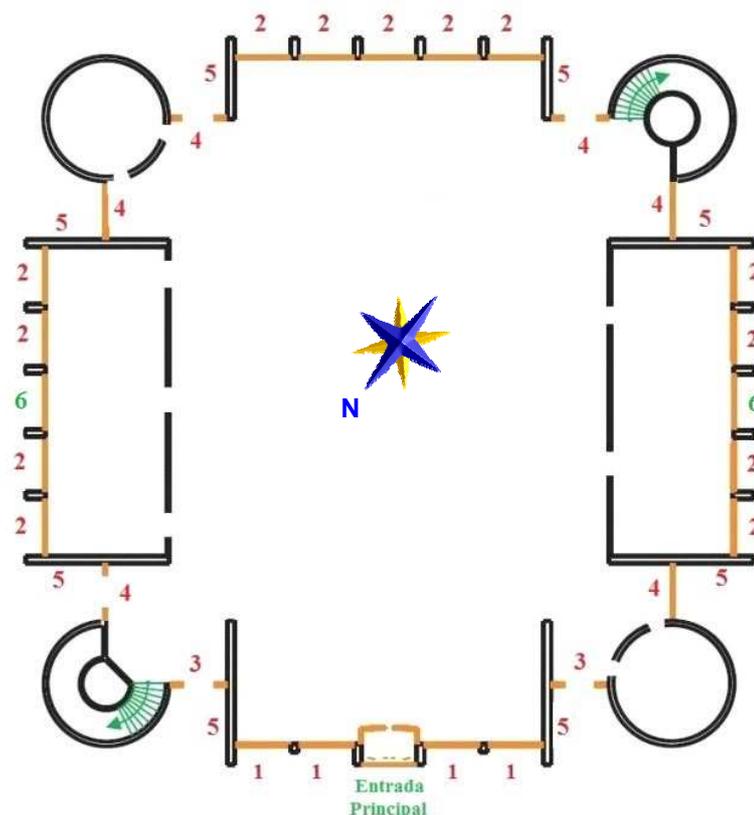


Figura 2: Esquema de planta baja (similar al de planta alta) con la ubicación de los componentes de las fachadas.
 1: Paneles vidriados del frente, 2: Muros y ventanas, 3,4: Puertas y paneles vidriados retirados de la línea perimetral, 5: Muros, 6: Calderas.

Las temperaturas internas T_{iB} de la planta baja y T_{iA} de la planta alta del edificio se determinaron promediando los registros de dos sensores *HOBO* U12 instalados en cada planta en puntos específicos que miden cada 10min con una precisión de $\pm 0.35^\circ\text{C}$ y resolución de 0.03°C a 25°C . La temperatura externa T_e se obtiene de los registros del Servicio Meteorológico Nacional adquiridos en su estación localizada en terrenos de la VI Brigada Aérea de la Fuerza Aérea Argentina en Tandil, y convalidada con la estación meteorológica *Decagon Em50* del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) ubicada en el Campus a 200m del edificio.



Figura 3: Algunos de los sectores que conforman las fachadas del edificio evaluado.

Cálculo del flujo de calor a través de la envolvente

El flujo de calor q por unidad de área (o densidad del flujo de calor en W/m^2 en el SI de unidades) a través de la envolvente de un edificio es

$$q = K(T_e - T_i), \quad (1)$$

donde K ($Wm^{-2}K^{-1}$) es la transmitancia térmica. En el caso de muros y aberturas al exterior, el valor de K se obtiene por medio de la resistencia térmica R que es la suma de tres términos:

$$R = \frac{1}{K} = R_{si} + \frac{e}{k} + R_{se}. \quad (2)$$

Observar que un término corresponde a la conducción en el material y los otros representan dos resistencias térmicas superficiales, R_{si} y R_{se} , asociadas con la influencia de las capas límite interna y externa, respectivamente, establecidas por la convección natural del aire en contacto con las superficies. En (2), e es el espesor y k es la conductividad térmica del material (W/mK) cuyos valores se encuentran tabulados para los estándares argentinos en la norma IRAM 11601. Dicha norma también establece para el diseño los valores $R_{si} \approx 0.13$ y $R_{se} \approx 0.04m^2K/W$ 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”.

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). Esto lleva a que se adopten valores constantes para estimar las resistencias superficiales, como aquellos de las normas IRAM, para establecer la envolvente más adecuada a la zona bioclimática de construcción. Sin embargo, puede emplearse la metodología descrita a continuación para establecer las resistencias superficiales en una edificación ya existente.

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 (Fig. 4). El flujo de calor en el estado estacionario es el mismo en todas las capas y su valor es dado por (1) que, usando (2), se transforma en:

$$q \left(R_{si} + \frac{e}{k} + R_{se} \right) = (T_i - T_e). \quad (3)$$

Luego,

$$qR_{si} = T_i - T_1, \quad (4a)$$

$$q \frac{e}{k} = T_1 - T_2, \quad (4b)$$

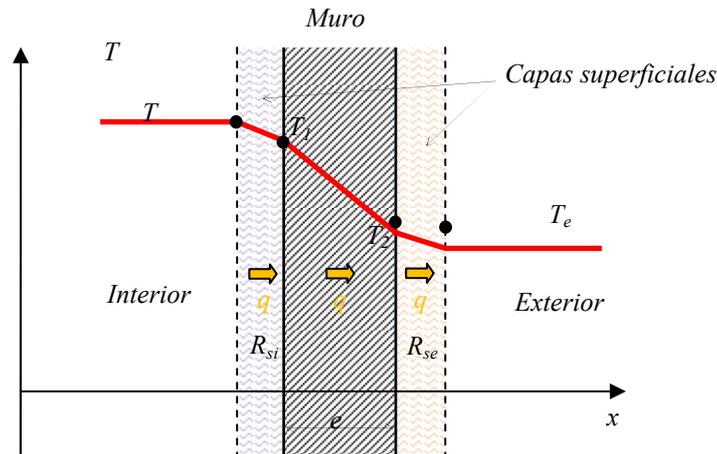


Figura 4: Variación de temperatura entre el interior y el exterior de la construcción, considerando las capas superficiales de aire de la envolvente.

$$qR_{se} = T_2 - T_e, \quad (4c)$$

y las resistencias relativas resultan:

$$\frac{R_{si}}{R} = \frac{T_i - T_1}{T_i - T_e}, \quad (5a)$$

$$\frac{e/k}{R} = \frac{T_1 - T_2}{T_i - T_e}, \quad (5b)$$

$$\frac{R_{se}}{R} = \frac{T_2 - T_e}{T_i - T_e}. \quad (5c)$$

El flujo de calor que se pierde a través del área total A de la superficie es $Q = qA$ calculado de acuerdo a la Norma IRAM 11601 sumando las diferentes contribuciones de la envolvente. Las Ecs. (4)-(5) reflejan la importancia de realizar mediciones de las temperaturas superficiales en la envolvente, no sólo en el laboratorio bajo condiciones controladas, sino en condiciones reales del sitio donde se emplaza la edificación. En efecto, midiendo T_1 y T_2 , y conociendo las características del material (i.e. los parámetros e y k), se calcula el flujo de calor por medio de (4b) y las resistencias superficiales mediante (4a) y 4(c).

RESULTADOS

La Fig. 5 muestra la evolución de las temperaturas T_i , T_1 y T_2 en los paneles de vidrio, y T_e mientras en la Fig. 6 se representa la evolución de las diferencias relativas (Ecs. 5) en diferentes momentos del día y para los mismos días de registro. Se observa que las resistencias de ambas capas superficiales de aire son tan importantes como la resistencia térmica del material, adoptan valores diferentes a los de diseño y cambian con el tiempo: son similares a primera hora del día para luego diferenciarse. Al mediodía, $T_1 \approx T_i$, probablemente porque la radiación solar calienta el aire próximo a las superficies. En ese caso, la resistencia R_{si} es despreciable y la resistencia total R se distribuye entre los dos términos restantes.

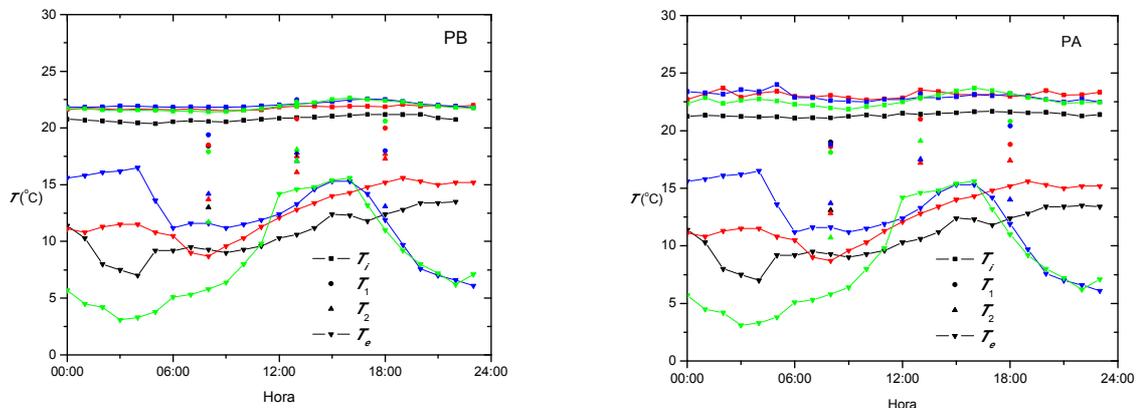


Figura 5: Evolución de las temperaturas en el interior, sobre las caras interna y externa de las superficies vidriadas, y en el exterior para las plantas baja (PB) y alta (PA) del edificio, registradas el 16 de junio (negro), y 14 (rojo), 15 (azul) y 16 (verde) de julio de 2014.

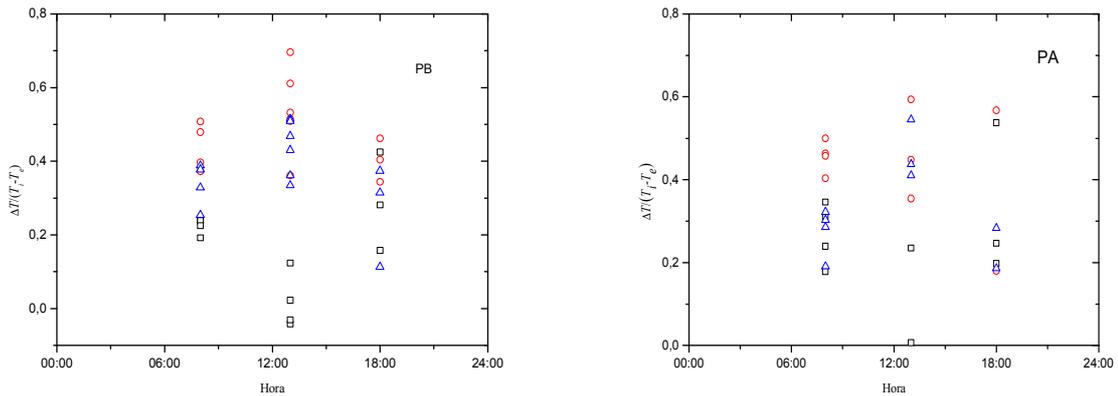


Figura 6: Diferencia de temperatura entre el interior y la cara interna del vidrio ($\Delta T = T_i - T_1$: cuadrados), entre las caras interna y externa del vidrio ($\Delta T = T_1 - T_2$: círculos), y entre la cara externa y el exterior ($\Delta T = T_2 - T_e$: triángulos).

El flujo de calor se calcula empleando la Ec. (4b) con los valores de temperatura superficiales T_1 y T_2 registrados con la cámara termográfica y con la emitancia del material en cada caso. El flujo total de calor a través de la envolvente se obtiene, en forma análoga, para cada componente definido en la Fig. 2, y los resultados parciales y total se presentan en las Tablas 2 y 3. Se observa que las resistencias superficiales de los muros y superficies vidriadas de igual espesor dependen de su ubicación y hora del día. Esto confirma la dinámica compleja de las capas límites superficiales de aire, como se menciona más arriba, debido a la existencia de otros muros cercanos, y a las distintas radiación solar y acción del viento que recibe cada componente en ese momento. Sin menoscabar la significación de estos factores, resulta importante obtener valores indicativos promedio. Una forma de hallarlos es relacionando los resultados con la diferencia de temperatura ($T_i - T_e$) como se muestra en la Fig. 7 para los vidrios de la fachada frontal. Para todos los materiales (muro, vidrio,...) se observa una dependencia lineal como la mostrada en esta figura, excepto para algunos valores correspondientes a los muros obtenidos al mediodía cuando el cielo está despejado. En estos casos $T_2 > T_i$ debido al calentamiento solar de las paredes, verificándose un flujo de calor hacia el interior, por lo que su contribución no se considera en los promedios mostrados en las Tablas 2 y 3. Esto no afecta al valor final del flujo total de calor ya que la mayoría de las mediciones se registraron durante días nublados y, además, la contribución de los muros es secundaria como indican los resultados de la Tabla 3. En efecto, el 53% de la superficie considerada de la envolvente es vidriada y contribuye con el 83% al flujo de calor total debido a su mayor conductividad térmica respecto de la de los muros. Notar que el flujo de calor q también tiene coeficientes diferentes en la dependencia con $(T_i - T_e)$ dependiendo del material que constituye cada componente de la envolvente y su ubicación (ya que cambian las resistencias superficiales). La variación del flujo de calor total Q se ilustra en la Fig. 8. Esta información es útil especialmente porque la construcción analizada forma parte del Campus de la UNCPBA y no se cuenta con medidores de consumos de gas y electricidad individualizados por edificio.

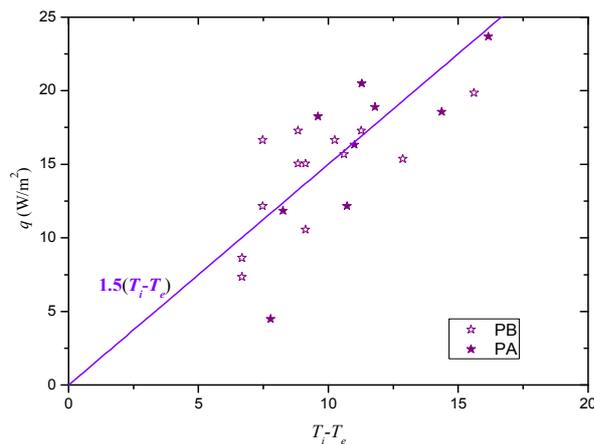


Figura 7: Flujo de calor por unidad de área a través de los componentes vidriados de la fachada frontal en ambas plantas en función de la diferencia térmica entre interior y exterior. El coeficiente de correlación de la recta de mejor ajuste es 0.54.

CONCLUSIONES

La termografía infrarroja se emplea aquí para obtener las temperaturas superficiales de las fachadas de un edificio y, junto con las temperaturas interior y exterior medidas en forma independiente, calcular las resistencias térmicas superficiales. Se aprovecha el hecho que las capas de aire próximas a la superficie son transparentes a la radiación infrarroja que emiten las superficies para mostrar que es posible realizar medidas de la temperatura superficial *in-situ* y así obtener información que es

difícil de lograr por otra vía. Por ejemplo, puede detectarse cuanto cambian las resistencias de las capas superficiales durante el día y en diferentes partes de la edificación, o detectar la acumulación de calor en los muros debido a la radiación solar.

		Superficies vidriadas (Componente 1)			Ventanas(componente 2)			Componente 3 (frente)		
		8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h
PB	R_{si}/R	0.226	0.222	0.147	0.349	0.226	0.226	0.251	0.093	0.209
	$e/(kR)$	0.439	0.441	0.490	0.444	0.439	0.439	0.308	0.359	0.413
	R_{se}/R	0.337	0.338	0.363	0.207	0.337	0.337	0.441	0.548	0.378
	q (W/m ²)	1.5(Ti-Te)			1.5(Ti-Te)			0.8(Ti-Te)		
PA	R_{si}/R	0.269	0.328	0.336	0.389	0.269	0.269			
	$e/(kR)$	0.456	0.406	0.357	0.467	0.456	0.456			
	R_{se}/R	0.275	0.266	0.307	0.145	0.275	0.275			
	q (W/m ²)	1.5(Ti-Te)			1.5(Ti-Te)					

		Ventanales laterales (4)			Muros laterales (5)			Muros en Componente 2		
		8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h
PB	R_{si}/R	0.224	0.118	0.321	0.170	0.114	0.061	0.155	0.198	0.218
	$e/(kR)$	0.523	0.727	0.670	0.416	0.303	0.485	0.656	0.433	0.665
	R_{se}/R	0.253	0.156	0.069	0.414	0.583	0.454	0.188	0.369	0.117
	q (W/m ²)	1.9(Ti-Te)			0.3(Ti-Te)			0.45(Ti-Te)		
PA	R_{si}/R				0.290	0.211	0.254	0.215	0.290	0.285
	$e/(kR)$				0.375	0.299	0.304	0.633	0.440	0.640
	R_{se}/R				0.336	0.490	0.442	0.152	0.270	0.075
	q (W/m ²)				0.3(Ti-Te)			0.45(Ti-Te)		

Tabla 2: Resistencias superficiales y flujos de calor promedios. La ubicación de los componentes de la envolvente se indica en la Fig. 2 y sus características se describen en la Tabla 3.

Nº	Componentes:	e (m)	K (W/m ² K)	A(m ²)	Factor (W/m ² K)	Contribución a Q(W)	Porcentaje de Q(%)
1	Vidrios de la fachada frontal	0.024	3.2	91.09	1.5	136.64	19.5
2	Ventanas	0.024	3.2	136.52	1.5	204.78	29.2
3	Puertas y ventanales retirados, fachada frontal	0.028	2.8	37.21	0.8	29.77	4.2
4	Puertas y ventanales retirados, fachadas laterales	0.02	3.2	111.43	1.9	211.72	30.2
5	Muros, fachadas laterales	0.3	0.72	230.92	0.3	69.28	9.9
2	Muros, debajo de ventanas, fachadas laterales	0.3	0.72	109.24	0.45	49.16	7.0
	Total:			716.42		701.34	100.0

Tabla 3: Características y flujo de calor a través de los muros y las superficies vidriadas verticales del edificio.

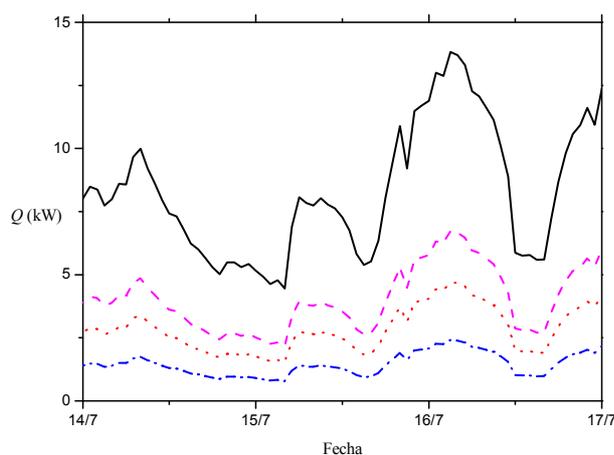


Figura 8: Flujo de calor total (línea continua) y las contribuciones de los vidrios del frente y las ventanas (línea de trazos), puertas y ventanales de vidrio retirados de la línea de la edificación (línea de puntos), y muros (línea de puntos y trazos).

Se obtuvieron valores representativos adecuados del flujo de calor por conducción en las superficies planas verticales de ambas plantas del edificio evaluado. En las mediciones efectuadas se observa que la resistencia térmica de los materiales es similar a las superficiales tanto en los vidrios como en los muros. Dicho de otra forma, la conductividad térmica efectiva de

la envolvente es prácticamente la mitad de la conductividad específica de los materiales debido a las capas de aire superficiales interna y externa. Los resultados son válidos para este edificio y bajo las condiciones de medición en los días reportados, y muestran la importancia de tener determinaciones cuantitativas del flujo de calor en las edificaciones, luego de construidas, en su lugar de emplazamiento. Siguen el análisis de la acumulación de calor en los muros, de la influencia de diferentes situaciones meteorológicas, y de las capas límites en función de la hora del día, ubicación de los parasoles y entradas en la envolvente, y dirección de los vientos dominantes, lo cual conformará un próximo trabajo.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- Alias H., Jacobo G., Martina P. y Corace J. (2013). Aplicación cualitativa de la termografía en el diagnóstico higrotérmico edilicio: Caso de la sede de la Facultad de Arquitectura de la UNNE. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 1, 05.105-114.
- Avdelidis N.P. y Moropoulou A. (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage* 5, 119–127.
- Balaras C. y Argirou A. (2002) Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings* 34, 171–183.
- Chrysochoos A., Berthel B. y Latourte F. (2008). Local energy analysis of high-cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 43(6), 411–421.
- Clark M.R., McCann D.M. y Forde M.C. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT&E International* 36, 265–275.
- Czajkowski, J.D. y Rosenfeld, E. (1992). Regionalización bioclimática de la provincia de Buenos Aires. Actas XV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, San Fernando del Valle de Catamarca.
- Flores Larsen S. y Hongn M. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: Aplicaciones cualitativas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16, 08.25-32.
- Goldstein R.J. (1978). Application of aerial infrared thermography to the measurement of building heat loss. *ASHRAE Trans.* 84, 207-226.
- Grinzato E., Bison P.G., Cesini G. y Ricci R. (1990). Quality control of cold store assembling by IR thermography and numerical simulation, I.I.F. Commission B2, C2, D1, D2, D3. Dresden, Germany, pp. 743-748.
- Grinzato E., Vavilov V. y Kauppinen T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings* 29, 1-9.
- Hoyano A., Asawa T. y Yashiro R. (2009). Generation of surface temperature image in built environment space using the 3D thermograph and ray tracing method. *I.E.E.J. Transactions on Fundamentals and Materials* 129 (11), 791–798.
- INTI (2005). Ahorro y certificación energética: la envolvente de los edificios. “Saber cómo”, N° 27, pp. 4. <http://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc27/inti5.php>
- IVBA (2014). Normas Técnicas para Proyectos de Conjuntos Habitacionales. Cap. 4: Acondicionamiento higrotérmico de edificios. Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires. www.vivienda.mosp.gba.gov.ar
- Keyserling J.R., Ahlgren P.D., Yu E., Belliveau N. y Yassa M. (2000). Functional infrared imaging of the breast—historical perspectives, current applications and future considerations. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 19(3), 33–41.
- Lagüela S., Martínez J., Armesto J. y Arias P. (2011). Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies. *Energy and Buildings* 43, 1216–1221.
- Lanzetti A. (2014). Manual de Aplicación Ley 13059: Acondicionamiento higrotérmico de edificios. Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires. http://www.vivienda.mosp.gba.gov.ar/varios/manual_ac_higrotermico.pdf
- Ledesma S.L., Gonzalo G.E., Cisterna M.S., Márquez Vega S.G., Quiñones G.I., Nota V.M. (2004). Evaluación comparativa de eficiencia de parasoles y su incidencia en la iluminación natural de aulas en San Miguel de Tucumán. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 8, 05.55-60.
- Lindquist T.M. y Bertling L. (2008). Hazard rate estimation of high-voltage contacts using infrared thermography. In: *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 233–239.
- Mack R.T. (1985). Energy loss profiles: foundation for future profit in thermal imager sales and service. *IRIE*, 5th Infrared Information Exchange, New Orleans, USA, pp. 15-24.
- Martín S., Cañas I. y González I. (2004). Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy and Buildings* 34, 515–523.
- McCafferty D.J. (2007). The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Review* 37 (3), 207–223.
- McMullan P. (1990). Assessing structural components of new masonry construction utilizing infrared thermography. *Proceedings of SPIE* 1313, 78.
- Melgosa Revillas S. (2011). Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. <http://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=168>.
- Rizzi A., Voltolini F., Remondino F., Girardi S. y Gonzo L. (2007). Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritage. VIII Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 2, Zurich, pp. 16–24.
- Rosina E. y Spodek J. (2009). Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana. *APT Bulletin* 34, 11–16.
- Sandrolini F. y Franzoni E. (2006). An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings. *Building and Environment* 41, 1372–1380.

Sanglier G. (2003). Aplicación de la termografía al estudio de pérdidas energéticas en edificios. In: Teledetección y Desarrollo Regional, X Congreso de Teledetección, pp. 329–332.

ABSTRACT

The infrared thermography is a fundamental tool in qualitative studies of energetic efficiency, detection of humidity and heat loss problems in buildings, and its use is increasing. In this work, it is employed to obtain the internal and external surface temperatures of the façades of a particular construction as part of a methodology to quantify the losses of heat by conduction through the building envelope, taking advantage of the transparency of the air to the infrared radiation emitted by the surfaces. It is found that the thermal resistance of the boundary layers on the glass areas and walls is similar to that of the materials, thus significantly reducing the effective thermal conductivity of the envelope of the evaluated construction. The findings show the importance of determining quantitatively the heat flux on site.

Keywords: infrared thermography, heat loss, surface thermal resistance, quantitative measurements, actual use conditions.