

20. Valores límite de pérdida energética en fachadas mediante termografía infrarroja

Moyano Campos, Juan José^(1,*), Antón García, Daniel⁽¹⁾, Rico Delgado, Fernando⁽¹⁾, Marín García, David⁽¹⁾

(*)E.T.S. Ingeniería de Edificación, Universidad de Sevilla, Avda. de Reina Mercedes nº 4, 41012 de Sevilla, España, jmoyano@us.es, 954556677.

(1) E.T.S. Ingeniería de Edificación, Universidad de Sevilla, Avda. de Reina Mercedes nº 4, 41012 de Sevilla, España.

Resumen El principal factor en el ahorro energético es la envolvente térmica de los edificios, donde tienen lugar las pérdidas o ganancias con el exterior. Este trabajo propone una nueva metodología para detectar los sectores más significativos en la transmisión de energía mediante la termografía infrarroja y la evaluación de la intensidad térmica de cada área de la parte ciega, elemento constructivo o puente térmico, considerando diferentes valores de velocidad del viento. La intensidad térmica se compara con los correspondientes valores límite de transmitancia térmica que ofrece la normativa de cada país en función de la zona climática. Este método proporciona una visión específica de elementos constructivos o envolventes en general en términos de pérdida energética empleando la intensidad térmica en lugar del tradicional análisis de transmisión de calor. Así, se halla cuantitativamente la pérdida energética a través de la envolvente. El principal objetivo de este trabajo es seleccionar elementos o sectores de la envolvente térmica de los edificios en función de su pérdida energética para evitar intervenciones de subsanación indiscriminadas en sus partes ciegas. La importancia de esta investigación radica en que pocos estudios han analizado las pérdidas energéticas globales en los edificios, evaluando cuantitativamente la intensidad térmica de todos los componentes de las partes ciegas de las fachadas. Este estudio avanza además en el análisis de la influencia de la intensidad térmica mediante la termografía infrarroja con distintas velocidades del viento en fachadas para evaluar el comportamiento térmico de los edificios cuando se pierde el régimen cuasi estacionario.

Palabras clave Termografía infrarroja, Intensidad térmica, Transmitancia térmica, Velocidad viento, Envolvente edificios.

1 Introducción

Recientes investigaciones demuestran que un porcentaje importante del consumo energético de energía primaria, así como de la emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), proceden del sector de la edificación. En Estados Unidos, según se desprende del informe “*Buildings energy data book*” realizado por el Departamento de Energía de EE.UU., alrededor del 38 % de las emisiones de CO₂, el 52% de SO₂, y el 20% de NO_x se producen a causa del consumo de energía relacionado con los edificios (Fesanghary et al. 2012). En la Unión Europea (EU), cerca de la mitad de la energía que se consume pertenece al sector de la construcción. Todo ello unido al compromiso de alcanzar los niveles de emisiones acordados en el *Protocolo de Kioto*, en cuanto a consumo energético y emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI), hacen que se estén originando cambios en la normativa reguladora del sector, orientándose el mismo hacia la consecución de edificios de consumo energético casi nulo.

De la misma manera, se están produciendo aspectos significativos en las normativas que regulan el sector de la edificación en los diferentes países. En el caso concreto de España, y a partir del 1 de junio de 2013 con el Real Decreto 235/2013 (Ministerio de la Presidencia 2013), es obligatorio poner a disposición de los compradores un certificado de eficiencia energética del edificio que se rehabilite, venda o se alquile. Con esta norma se pretende fomentar el uso de edificios más eficientes y proponer una serie de medidas destinadas a mejorar la calificación energética de los edificios a tenor de las recomendaciones de la Directiva Europea 2010/31/UE (Parlamento Europeo 2010). El cálculo de dicha eficiencia conlleva a su certificación energética y etiquetado, mediante los cuales se consideran los aspectos más determinantes del consumo energético del edificio.

Uno de los factores más importantes en el ahorro energético es el análisis de la envolvente en edificios existentes, ya que a través de ella tienen lugar las pérdidas o ganancias caloríficas. Al-Habaibeh y G. Anderson (2010) manifiestan que la rehabilitación de viviendas existentes podría reducir el consumo de energía en un 25%. El aislamiento térmico juega un papel esencial en la reducción del consumo de energía. Para compensar esta falta de aislamiento, el CTE obliga a incrementar el aislamiento en las partes ciegas (Castro 2009), obteniéndose finalmente un valor medio que quede por debajo del valor límite de transmitancia térmica establecido. Adicionalmente, hay otras medidas de bajo coste como podría ser la instalación de doble acristalamiento en ventanas y medidas para minimizar los puentes térmicos en la fase de la dirección de obra. Los errores constructivos durante el proceso de la ejecución del edificio también plantean problemas de pérdidas de energía. Por ello, se hace necesario establecer protocolos de actuación a la hora de la intervención o rehabilitación del edificio. Los últimos estudios realizados por Taylor et al. (2013) revelan la posibilidad de llevar a cabo controles a través de cámaras IR para identificar defectos de la envolvente en edificios en construcción mediante la termografía “activa”. Este sistema requiere de un método de

calentamiento adicional que genere una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la hoja.

Según datos del Ministerio de Vivienda del Gobierno Español, a partir del año 2006 que entró en vigor el Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE) (Ministerio de la Vivienda 2006), se habían construido alrededor de 715,000 viviendas cada año. El parque inmobiliario se ha visto incrementando en los últimos seis años en un 1.8 millones de viviendas nuevas (sujetas al CTE), de las cuales un 64% quedan aún por vender. Mejorar la eficiencia energética en este volumen de edificios reduciría el consumo general de energía y las emisiones de carbono, compromiso establecido por la UE en Horizonte 2020.

De esta forma, la técnica de la termografía infrarroja (*infrared thermovision technique* (ITT)) constituye un método de carácter no invasivo que permite a través del análisis de los termogramas, detectar pérdidas de energía en la envolvente, identificar problemas con las instalaciones eléctricas y detectar anomalías constructivas en los edificios (Balaras y Argiriou 2002). Son pocos los estudios que determinan la intensidad térmica de las paredes ciegas de los edificios a partir de la termografía infrarroja. Las investigaciones realizadas por Albatici y Tonelli (2010) han demostrado los buenos resultados que presenta la termografía infrarroja sobre el medidor de flujo de calor (HFM). Las ventajas de la ITT presentadas en este análisis determinan un método más rápido, con menos restricciones y con resultados más precisos que el medidor de flujo térmico.

2 Objetivo de la investigación

Este trabajo propone una nueva metodología para detectar los sectores más significativos de transmisión de la energía en la envolvente de los edificios, por medio de la termografía infrarroja y el cálculo de la intensidad térmica de la parte ciega, elementos constructivos y puentes térmicos, teniendo en cuenta diferentes valores de la velocidad del viento. Como resultado, se pueden llevar a cabo intervenciones selectivas en las fachadas y por lo tanto, una mejora optimizada de la eficiencia energética.

3 Antecedentes

La evaluación de la transmitancia térmica (valor U) está presente en toda auditoría energética de un edificio. Entre los distintos métodos de cálculo, se encuentra el método teórico y más empleado, que considera la fisionomía de la construcción a partir de información recogida por normativa (CTE). Sin embargo, hay ocasiones en las que no es posible obtener la información técnica de la envolvente de los edificios, por lo que su cálculo se basa en una inspección organoléptica. Autores

como Li et al. (2015) y Biddulph et al. (2014) afirman que este procedimiento puede conllevar errores de gran magnitud respecto a otros métodos experimentales. Sin embargo, atendiendo a la norma europea EN 13187:1998 (1998), la auditoría energética por infrarrojo conlleva proceder bajo unas condiciones climáticas óptimas. En la toma de datos hay que evitar la radiación solar, la lluvia, la velocidad del viento y un deficiente gradiente de temperatura. Los estudios llevados a cabo por Palyvos (2008) demuestran que el balance de energía térmica en la superficie de un edificio depende en gran medida de la convección inducida por el viento. Para el análisis termográfico en exteriores se recomienda que el viento no supere el valor de 2 m/s.

El balance general energético dependerá de las lesiones existentes en la envolvente. Para identificarlas se hace uso de la termografía infrarroja, pues permite detectar visualmente las diferencias de temperatura que registran los termogramas. Además, es preciso contar con una documentación gráfica exhaustiva que permita describir materiales, acabados y organización constructiva. Asimismo se necesita consultar los valores de emisividad de los diferentes materiales que intervienen en la envolvente (Rico y Moyano 2012). Por su parte, la humedad en la envolvente podría inducir a errores en la interpretación de los termogramas (Dall'O' et al. 2013), al igual que la acción directa de la radiación solar.

4 Metodología experimental

Para el desarrollo de la investigación se han tomado dos edificios de tipología constructiva de vivienda unifamiliar muy similares, con tres fachadas al exterior y una en medianera. Además, se ha estudiado un tercer edificio plurifamiliar con dos fachadas (norte y sur), considerándose como dos inspecciones independientes. Por lo tanto, las inspecciones en las muestras se han llamado en este trabajo Modelos 1 y 2, 3 y 4, respectivamente. Los edificios están situados en un barrio de la zona sur de Sevilla, por lo que la orientación de las envolventes analizadas está enmarcada en zona climática B4, según establece CTE, DB HE-1 en el apéndice B.

A través de una estación meteorológica portátil se registraron valores de temperatura exterior, interior y velocidad del viento durante 24 horas antes de los ensayos. Se colocó la cámara térmica entre 80-88° con respecto al plano del cuadro, y nunca perpendicular al elemento constructivo, evitando así la identificación de fuentes de reflexión térmica y baja emisividad (Lezana 2011).

La medición registrada en las imágenes termográficas se desarrolló a través de una calibración del equipo que consiste en determinar la temperatura superficial reflectante mediante un termómetro de contacto en un punto del plano de la fachada para compararlo con la temperatura en tiempo real de la cámara termográfica. Esta calibración determina que la temperatura obtenida por la cámara es igual a la temperatura de la superficie real. Fue propuesta por autores

como Hoyano et al. (1999) cuando las emisividades de los materiales no son bajas. Esta forma de proceder en la medición está contrastada con las investigaciones de los autores Cerdeira et al. (2011) y Vidas y Moghadam (2013). Uno de los planteamientos que viene a confirmar la complejidad de los valores de emisividad empleados en termografía es la condición de aspecto (Avdelidis y Maropoulou 2003): edad de los materiales, la rugosidad y la capacidad de absorber energía en una exposición al medio ambiente. En la literatura científica se cuestiona la utilización de las tablas de emisividad para fines de termografía infrarroja en los edificios, ya que como se ha expuesto anteriormente, los valores varían en una medición bajo condiciones de transferencia de calor no estacionarios (Fokaides et al. 2011). En el procedimiento, se asegura que la diferencia de temperatura, tanto interior como exterior en las dos muestras analizadas, sea mayor de 10° C o 10 K. El Modelo 1, realizado el 30 de mayo de 2013, presenta temperaturas más altas que el Modelo 2, realizado el 3 de febrero de 2014. Los Modelos 3 y 4 también fueron realizados en invierno, el 28 de enero de 2016 y el 16 de febrero de 2016, respectivamente. La Fig. 1 muestra la realidad arquitectónica del Modelo 2.



Fig. 1 Edificio correspondiente al Modelo 2 con superposición de termograma

A fin de obtener una imagen en verdadera magnitud de los elementos constructivos analizados, una vez obtenidos los termogramas de la fachada se procede a su rectificación mediante aplicaciones específicas (Herráez y Navarro (1997). Se complementa mediante *software* de CAD, que determina las áreas de envolvente de distinta tipología constructiva y con variaciones de temperatura.

En el paso siguiente se procede a enmarcar las zonas delimitadas dentro de la imagen térmica (Fig. 2). Las áreas se han clasificado según la variación de la transmitancia térmica en cerramientos estándar, y otras como pueden ser los puentes térmicos. Se diferencia los pilares de los forjados y elementos que conforman los huecos, como las mochetas y dinteles que cierran los huecos de ventana y partes del cerramiento donde se encuentra una transmitancia térmica (valor U) distinta del resto. Las regiones se han considerado por su temperatura, material, forma y ubicación que ocupan en las partes ciegas de la envolvente.

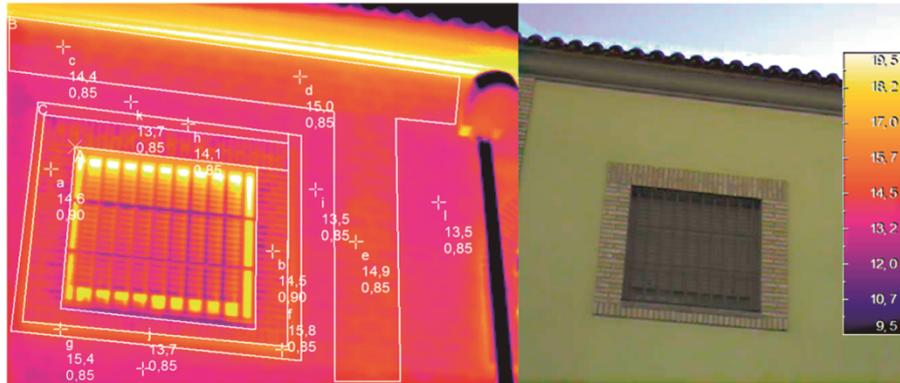


Fig. 2 Termograma e imagen visible del Modelo 1

A continuación, se procede a un análisis previo de los resultados a través de los *software* informático “InfReC Analyzer NS9500” y FLIR Tools, realizando el procesamiento final de los termogramas con la aplicación “Image Processor Pro II”, obteniéndose la temperatura promedio superficial en cada uno de los sectores de la fachada. Dentro de la delimitación de cada área poligonal marcada, se establece el promedio de temperatura mediante la Ec. 1.

$$T_m = \Sigma(A \cdot T_i) / \Sigma A \quad (1)$$

Siendo T_m la temperatura superficial ponderada del paramento en Kelvin, T_i la temperatura superficial de cada elemento constructivo, sector o puente térmico en Kelvin y A el área de cada uno de ellos en metros cuadrados. De esta manera, a cada sector se le asocia un porcentaje de su temperatura superficial en función del área que ocupa respecto a la total y así se relaciona con la transmitancia térmica y por tanto, con la intensidad térmica que desarrolla cada uno de ellos.

Con el siguiente paso se procede al cálculo de U por el método de la termografía infrarroja (ITT), en base a los estudios de Albatici y Tonelli. Los parámetros de la Ec. 2 tienen que ver con la inspección termográfica, factores climatológicos y emisividad de los distintos materiales que componen la envolvente, así como las partes constructivas que hay que analizar.

La ecuación de cálculo de dicha transmitancia es la siguiente:

$$U = (5.67 \varepsilon_{tot} ((T_m/100)^4 - (T_{out}/100)^4) + 3.8054 \nu (T_m - T_{out})) / (T_{int} - T_{out}) \quad (2)$$

Donde T_{int} es la temperatura del ambiente interior en Kelvin, T_{out} la temperatura del ambiente exterior en Kelvin, ν la velocidad del viento en m/s y ε_{tot} es la emisividad total (coeficiente).

5 Valores límite

Para establecer los valores límite de transmitancia térmica U (W/m^2K) en las partes ciegas de los cerramientos se tiene en cuenta la zona climática de los modelos de análisis. El valor U_{lim} (W/m^2K) en cerramientos y particiones interiores en la envolvente térmica, que establece en España el CTE-DB en su sección HE-1 limitación de demanda energética, es de $0.82 W/m^2K$ del edificio de referencia, y el valor de transmitancia térmica máxima U_{max} (W/m^2K) nunca debe superar el valor de $1.07 W/m^2K$ para la zona clasificada B4. Para proceder a su comparación, en este estudio se ha tenido en cuenta la ponderación del valor U de diferentes sectores de un paramento para la obtención de un valor general, en función del área que ocupa cada elemento constructivo o puente térmico según la Ec. 3, como indica la norma.

$$U_{Mm} = (\Sigma(A_{(M)}U_{(M)}) + \Sigma(A_{(PF)}U_{(PF)})) / (\Sigma A_{(M)} + \Sigma A_{(PF)}) \quad (3)$$

Siendo U_{Mm} la transmitancia térmica ponderada del paramento en (W/m^2K), A el área de cada sector (M) o puente térmico (PF) en m^2 y U la transmitancia térmica de dichos elementos en (W/m^2K).

Con todo, se propone la implantación de valores límite de pérdida energética para la potencia térmica por unidad de superficie (intensidad térmica) a partir de valores de transmitancia térmica que los distintos sectores de la envolvente desarrollan, en función de los valores máximos de transmitancia térmica correspondientes a la zona climática que se trate.

Los límites de intensidad térmica provenientes de los valores límite de transmitancia térmica de la zona climática establecidos en el apartado 6, se calculan empleando la expresión que proporcionan Díaz y Tenorio (2005), según la Ec. 4.

$$\phi_t = U A (T_{int} - T_{out}) \quad (4)$$

Donde ϕ_t es la potencia térmica en W y para T puede emplearse la unidad $^{\circ}C$ a fin de facilitar la comprensión, especialmente en la Tabla 1.

6 Resultados y discusión

Como resultado de la aplicación de esta metodología, se presenta la Tabla 1 del Modelo 1 como ejemplo para clarificar el procedimiento de cálculo de las pérdidas energéticas y su comparación con los límites establecidos. Los resultados de todos los Modelos se recogerá posteriormente en la Fig. 3, tras la explicación de la siguiente tabla:

Tabla 1 Resultados de intensidad térmica del Modelo 1

Elemento	A (m ²)	U (W/m ² K)	T_m (°C)	ΔT_m (°C)	ϕ_t (W)	ϕ_t/A (W/m ²)	L_{sup} (W/m ²)	$\phi_t/A - L_x$ (W/m ²)
Cerramiento estándar	29.71	1.33	15.10	0.00	395.75	13.32		2.62
Cerramiento de baño	3.47	0.82	14.68	-0.42	28.58	8.23		-2.47
Muro de sótano	8.30	5.99	18.91	3.81	497.65	59.93		49.23
Zócalo inferior	0.98	4.54	17.73	2.63	44.45	45.42		34.72
Zócalo superior	0.97	3.97	17.26	2.16	38.47	39.66		28.96
Frente de pilares 35cm	1.75	1.41	15.16	0.06	24.53	14.05		3.35
Frente de forjados	7.57	2.10	15.73	0.63	158.72	20.98	10.70	10.28
Frente de pilares 30cm	3.97	1.77	15.46	0.36	70.29	17.70		7.00
Cercado huecos 1 pie	5.23	1.51	15.25	0.15	79.26	15.14		4.44
Mochetas de ventana	2.67	1.53	15.26	0.16	40.75	15.27		4.57
Mochetas de baño	1.21	1.53	15.26	0.16	18.49	15.27		4.57
Pie de replanteo	0.91	1.89	15.56	0.46	17.21	18.91		8.21
Cerramiento cubierta	2.91	2.99	16.46	1.36	87.00	29.88		19.18
TOTAL	69.65	2.16	15.77	0.67	1501.13	21.55	...	10.85
						L_m (W/m ²)	8.20	13.35

Donde ΔT_m es la diferencia térmica entre un elemento y el sector más predominante sin alteraciones térmicas –cerramiento estándar–; ϕ_t/A intensidad térmica; L_x valor límite superior L_{sup} o valor límite medio L_m de intensidad térmica, según se trate, que emanan del CTE.

En el análisis en la Tabla 1, la fila total se refiere al valor ponderado de cada magnitud en función del área de cada elemento (no media aritmética), excepto para los parámetros A y ϕ_t , que se refiere al sumatorio de los valores de cada columna. Así, el valor total de U (W/m²K) es el resultado de aplicar la Ec. 3, y se corresponde con el promedio de transmitancia térmica U_{Mm} de la fachada.

Este trabajo analiza valores de ϕ_t/A , que precisan de la conversión del valor de transmitancia límite –impuesto por la norma nacional correspondiente– a esta magnitud, con vistas a compararlo directamente con el estado energético de la envolvente. Relacionando analíticamente los valores límite de intensidad térmica –provenientes de la transmitancia térmica de la citada normativa– con el valor de ϕ_t/A de cada sector de la envolvente, el resultado indicará directamente qué zonas son más influyentes en la pérdida energética de la fachada. Estos límites se obtienen despejando de la Ec. 4 el valor de ϕ_t/A , es decir, realizando el producto del valor U por la diferencia de temperatura entre el espacio interior de la vivienda y el exterior. Por consiguiente, los límites de intensidad térmica propuestos variarán en función de las condiciones meteorológicas y de la temperatura interior.

Tras la aplicación del límite superior L_{sup} en la columna $\phi_t/A - L_x$, pueden obtenerse valores en negativo que se corresponden con los sectores que todavía admiten un incremento de ϕ_t/A hasta alcanzar dicho límite; o lo que es lo mismo, cuya transmitancia térmica cumpla con lo establecido en la normativa de aplicación vigente, por lo que presentan pérdidas energéticas admisibles.

Por el contrario, los valores en positivo calculados en la columna $\phi_t/A - L_x$ pertenecen a los elementos que cuentan con ϕ_t/A superior al límite establecido por normativa L_{sup} , necesitando intervención para subsanar las pérdidas energéticas.

Realizando la media ponderada de ϕ_t/A en su columna correspondiente en función del área total de la fachada, se obtiene la situación energética general de la misma. Atendiendo a los valores de U de cada zona climática, se propone un valor límite L_m de ϕ_t/A que la envolvente del edificio no debe superar, considerando su comportamiento energético a nivel general. En el Modelo 1, el valor medio de ϕ_t/A de la fachada es de 21.55 W/m² (ver Tabla 1 o Fig. 3), suponiendo exceso de intensidad térmica respecto al límite de 8.20 W/m² (proveniente del 0.82 W/m²K de la zona climática B4 del CTE). En cambio, en el Modelo 2, al comparar su valor promedio de 7.21 W/m² de ϕ_t/A con el límite para su gradiente térmico, los valores resultantes son negativos y por tanto, favorables energéticamente. Un mayor espesor del aislamiento térmico en la envolvente, unido a tipologías constructivas que no constituyen o que minimizan puentes térmicos, logran un descenso de las pérdidas energéticas a través de la envolvente.

Asimismo, la importancia de la velocidad del viento en la pérdida energética ha sido analizada. La Fig. 3 recoge valores de ϕ_t/A de sectores en particular en las envolventes de todos los Modelos y global de sus fachadas, los límites para dicha pérdidas energéticas y la velocidad del viento en cada inspección.

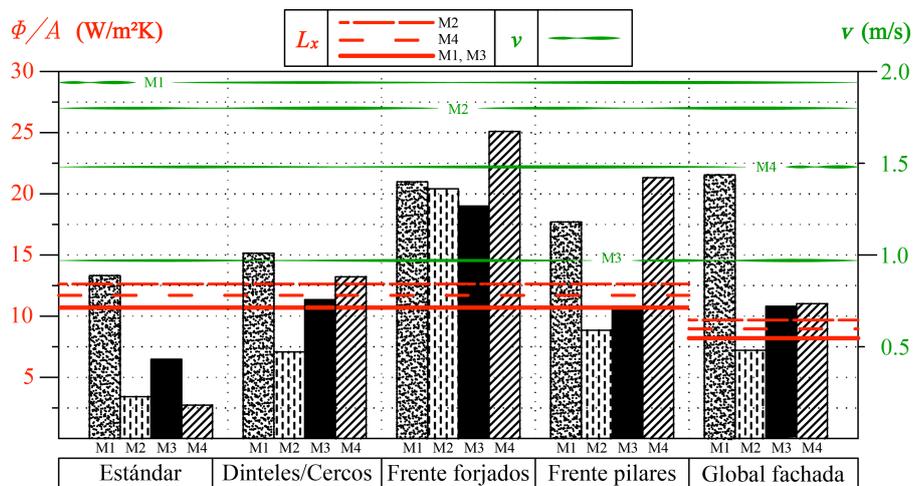


Fig. 3 Resultados de intensidad térmica y viento en los Modelos 1, 2, 3 y 4

Como se muestra, valores elevados de v en el Modelo 1 provocan un aumento en ϕ_t/A y por tanto, en la transmitancia térmica y pérdida energética. En cambio, en el Modelo 2, que cuenta con mayor espesor de aislamiento térmico en su envolvente, la pérdida energética es claramente inferior, excepto en frentes de forjado, que no se resuelven de manera adecuada. Por otra parte, a pesar de tratarse del mismo edificio –véase la ϕ_t/A ponderada de la fachada en los Modelos

3 y 4—, en los puentes térmicos del primero v es reducido, causando que ϕ_t/A se reduzca de forma significativa respecto al segundo, expuesto a mayor velocidad del viento. El caso extremo de influencia del viento es en su ausencia, lo que genera la desaparición de la convección y deja a la radiación como único modo de transmisión de calor (véase el impacto de un valor cero de v en la Ec. 2).

A modo explicativo, también se compara la previsión teórica y el resultado empírico. Los valores de transmitancia térmica teóricos calculados a través de la planimetría y la normativa, son de 0.60 y 0.40 W/m²K para los Modelos 1 y 2, respectivamente. Puede apreciarse que estos valores teóricos U_{Mm} ponderados de la fachada se encuentran por debajo de la transmitancia calculada posteriormente empleando la termografía infrarroja con mayor v (2.16 y 0.61 W/m²K). Por el contrario, el valor U_{Mm} en los Modelos 3 y 4 asciende a 1.15 W/m²K, que es ligeramente superior a la U obtenida a través de esta metodología con v inferior (1.08 y 1.01 W/m²K).

7 Conclusiones

La importancia de esta investigación es que pocos estudios han desarrollado análisis cuantitativos de intensidad térmica global y de componentes de la envolvente en edificios existentes. Con este protocolo se realiza en fachadas una actuación selectiva en anomalías térmicas detectadas que tienen una repercusión significativa en la pérdida energética. Así, se evitan actuaciones indiscriminadas y optimizan costes de rehabilitación, ahorrando recursos materiales y humanos. Se disminuye la inversión económica y el impacto ambiental en la actuación y en el ciclo de vida del propio edificio. Se espera que el trabajo mejore el desarrollo de auditorías energéticas y los buenos códigos de construcción.

Esta metodología conlleva ciertas consideraciones a tener en cuenta en relación a variables de procedimiento a fin de evitar errores significativos. No se deben usar cámaras infrarrojas de baja sensibilidad por aumento de distorsión en las lecturas. Además, la posición de algunos edificios en el entorno urbano hace que sus auditorías se desechen por inviabilidad (vegetación, mobiliario urbano, accesorios en fachadas, etc.). También se deben considerar factores climatológicos que determinen un gradiente de temperatura de al menos 10 K (habitualmente en verano e invierno, o garantizándolo mediante equipos de climatización).

Finalmente, cabe destacar la diferencia existente entre el valor de transmitancia térmica teórica y el obtenido en el proceso de inspección termográfica. Esto denota la gran influencia de las condiciones meteorológicas en la evaluación de la eficiencia energética. No obstante, a pesar de que los resultados apuntan claramente a la repercusión del viento en la pérdida energética, un mayor número de inspecciones podría dar lugar a una cuantificación más exhaustiva de dicha pérdida en función de determinados incrementos en la velocidad del viento.

8 Referencias

- Fesanghary M, Asadi S, Zong Woo Geem (2012) Desing of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. *Building and Environment* 49:245–250. doi:10.1016/j.buildenv.2011.09.030
- Ministerio de la Presidencia (2013) Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de edificios. In: *Boletín Oficial del Estado*. Available via DIALOG. <https://www.boe.es/boe/dias/2013/04/13/pdfs/BOE-A-2013-3904.pdf>. Accessed 13 Apr 2013
- European Parliament. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Off. J. Eur.Union* (2010), L153, 13–35
- Al-Habaibeh A, Anderson G (2010) Using infrared thermography for monitoring thermal efficiency of buildings –case studies from Nottingham Trent University. Paper presented at the 7th Jordanian international mechanical engineering conference (JIMEC'7), Amman-Jordan, 27–29 Sept 2010
- Castro, C (2009) Puentes térmicos en CTE HE1. In: Departamento Técnico de Dow Building Solutions. Available via DIALOG. <http://www.andimat.es/wp-content/uploads/articulo-ccastro-puentes-termicos-en-cte-he1>. Accessed 23 Sept 2015
- Taylor T, Counsell J, Gill S (2013) Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography. *Energy and Buildings* 66:222–231. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.051
- Ministerio de la Vivienda (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. In: *Boletín Oficial del Estado*. Available via DIALOG. <https://www.boe.es/boe/dias/2006/03/28/pdfs/A11816-11831.pdf>. Accessed 13 Apr 2013
- Balaras CA, Argiriou, AA (2002) Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings* 34:171–183. doi: 10.1016/S0378-7788(01)00105-0
- Albatici R, Tonelli AM (2010) Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings* 42:2177–2183. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.010
- Li Francis GN, Smith AZP, Biddulph P et al (2015) Solid-wall U-values: heat flux measurements compared with standard assumptions. *Building Research & Information* 43(2):238–252. doi: 10.1080/09613218.2014.967977
- Biddulph P, Gori V, Clifford AE et al (2014) Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements. *Energy and Buildings* 78:10–16. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.004
- AENOR (1998) UNE-EN 13187:1998. Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method (ISO 6781:1983 modified).
- Palyvos JA (2008) A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied Thermal Engineering* 28:801–808. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005

- Rico F, Moyano JJ (2012) Tratamiento gráfico de imágenes generadas con cámaras termográficas con tecnología de infrarrojo (IR) al servicio del mapeado de anomalías en fachadas de edificios históricos. Paper presented at the XI congreso internacional de expresión gráfica aplicada a la edificación, Universidad de Valencia, Valencia, 29-1 December 2012
- Dall'O' G, Sarto L, Panza A (2013) Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: Results of a Field Test. *Energies* 6(8):3859–3878. doi: 10.3390/en6083859
- Lezana A (2011) Infrared thermography applied to construction. *Eco-construction* 29:109
- Hoyno A, Asano K, Kanamaru T (1999) Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of building using time sequential thermography. *Atmospheric Environment* 33:3941–3951. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00136-3
- Cerdeira F, Vázquez ME, Collazo J, Granada G (2011) Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes. *Energy and Buildings* 43:1845–1851. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.029
- Vidas S, Moghadam P (2013) HeatWave: a handheld 3D thermography system for energy auditing. *Energy and Buildings* 66:445–460. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.030
- Avdelidis NP, Maropoulou A (2003) Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings* 35:663–667. doi:10.1016/S0378-7788(02)00210-4
- Fokaides PA, Kalogirou SA (2011) Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes. *Applied Energy* 88:4358–4365. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.014
- Herráez J, Navarro P (1997) Una práctica de fotogrametría desde principio a fin. *Fotogrametría aplicada a la arquitectura*. In: Abstracts of the 2nd jornadas de fotogrametría arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, Valladolid, 25–28 Nov 1997
- Díaz MI, Tenorio JA (2005) Pérdidas de calor y formación de condensaciones en los puentes térmicos de los edificios. Paper presented at the 1st jornadas de investigación en construcción, Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, 2–4 June 2005

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el V Plan Propio de Investigación (VPPI) de la Universidad de Sevilla.