

Análisis de la influencia del coeficiente de transferencia de calor en la caracterización de la transmitancia térmica de fachadas con el método termométrico

Analyzing the influence of the total heat transfer coefficient on the thermal transmittance characterization of facades with the thermometric method

David Bienvenido-Huertas (*), Manuel Jesús Carretero-Ayuso (**), Carlos E. Rodríguez-Jiménez (*), David Marín-García (***) , Juan Moyano (***)

RESUMEN

Caracterizar la transmitancia térmica de fachadas es uno de los pasos más importantes en los trabajos de auditoría energética. Para ello, existe una amplia variedad de métodos experimentales. Uno de los métodos de mayor utilización es el método termométrico. Sin embargo, existe una brecha de conocimiento en relación con el planteamiento de análisis de datos. Por este motivo, en este estudio se analizó la viabilidad de utilizar diferentes planteamientos para el método termométrico. Para ello, se analizaron 20 fachadas y se plantearon 9 formulaciones diferentes utilizando aproximaciones para el coeficiente total de transferencia de calor existentes en la literatura científica. Asimismo, se evaluaron dos planteamientos de análisis de datos (media aritmética de las medidas instantáneas, y media del sumatorio del numerador y del denominador), así como el filtrado de datos necesario de aplicar. Los resultados permitieron determinar la configuración de análisis más adecuada para aplicar el método.

Palabras clave: transmitancia térmica; fachadas; método termométrico; coeficiente de transferencia de calor; ensayo.

ABSTRACT

To assess the thermal transmittance of facades is one of the most important steps in energy audit work. For this, there is a wide variety of experimental methods. One of the most widely used methods is the thermometric method. However, there is a knowledge gap in relation to the data analysis approach. For this reason, in this study the feasibility of using different approaches to the method was analyzed. To do this, 20 façades were analyzed and 9 different formulations were proposed using approximations for the total heat transfer coefficient of the scientific literature. Likewise, two approaches to data analysis were evaluated (arithmetic mean of the instantaneous measurements, and the sum of the numerator and the denominator), as well as the data filtering necessary to apply. The results allowed determining the most suitable analysis configuration to apply the method.

Keywords: thermal transmittance; facades; thermometric method; heat transfer coefficient; test.

(*) Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Universidad de Sevilla. Sevilla (España).

(**) Fundación-Musaat y Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares (España).

(***) Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación, Universidad de Sevilla. Sevilla (España).

Persona de contacto/Corresponding author: jbienvenido@us.es (David Bienvenido-Huertas)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0716-8589> (David Bienvenido-Huertas); <http://orcid.org/0000-0002-8082-8996> (Manuel Jesús Carretero-Ayuso); <http://orcid.org/0000-0003-3792-3389> (Carlos Eugenio Rodríguez-Jiménez); <http://orcid.org/0000-0002-7652-5730> (David Marín-García); <http://orcid.org/0000-0002-2186-6159> (Juan Moyano)

Cómo citar este artículo/Citation: David Bienvenido-Huertas, Manuel Jesús Carretero-Ayuso, Carlos E. Rodríguez-Jiménez, David Marín-García, Juan Moyano (2021). Análisis de la influencia del coeficiente de transferencia de calor en la caracterización de la transmitancia térmica de fachadas con el método termométrico. *Informes de la Construcción*, 73(563): e409. <https://doi.org/10.3989/ic.82602>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cambio climático y la degradación ambiental se han convertido en dos de las principales preocupaciones de la sociedad. Una de las principales causas que ha provocado esta situación son las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Ante esta circunstancia, la Unión Europea ha establecido el objetivo prioritario de reducir las emisiones de estos gases a la atmósfera en un 80% a mitad del siglo XXI (1). Para ello, resulta necesario reducir el consumo energético de los diferentes procesos y actividades que realiza la sociedad. De todos ellos, el consumo energético asociado al sector de la edificación es uno de los más significativos, ya que son responsables del 40% del consumo energético total (2-4) y generan el 38% de la emisión de gases de efecto invernadero (5). Para garantizar los objetivos propuestos por la Unión Europea para el año 2050, se estima que el parque inmobiliario debe reducir sus emisiones en un 90% (1).

Para ello, resulta crucial que se mejora el rendimiento energético de los edificios existentes. El parque inmobiliario actual tiene un deficiente comportamiento, principalmente marcado por el deficiente rendimiento térmico de su envolvente. En este sentido, las propiedades termofísicas de la fachada tienen una influencia significativa en la demanda energética del edificio (6-11). Debido a su superficie, la fachada es el elemento de la envolvente por donde tiene lugar las mayores pérdidas energéticas (12), siendo la transmitancia térmica (U) una de las propiedades térmicas con mayor incidencia en el rendimiento energético del edificio (13-15), ya que permite cuantificar la transferencia de calor con el exterior (16,17). Así pues, determinar de manera correcta la transmitancia térmica permite proponer medidas adecuadas de ahorro energético. Para determinar la transmitancia térmica existe una amplia variedad de métodos, tanto teóricos como experimentales. El método de la ISO 9869-1 es uno de los métodos con mayor utilización a nivel científico. Sin embargo, uno de los métodos

experimentales de mayor utilización a nivel profesional es el método termométrico (MT) (18). Dicho método consiste en la determinación de la transmitancia térmica de un elemento mediante la medición de las temperaturas de los ambientes exterior e interior que separa el elemento y de su temperatura superficial interior (ver Figura 1). Para ello, se parte de la ecuación del método promedio de la ISO 9869-1 (Ecuación [1]) y mediante la Ley de Enfriamiento de Newton (Ecuación [2]), se obtiene la ecuación para el método termométrico (Ecuación [3]).

$$[1] \quad U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$$

$$[2] \quad q = h_{in}(T_{in} - T_{s,in})$$

$$[3] \quad U = \frac{\sum_{j=1}^n h_{in}(T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$$

Donde q [W/m^2] es el flujo de calor del elemento, $T_{s,in}$ [K] es la temperatura superficial interior de la fachada, T_{in} [K] es la temperatura del aire interior, T_{ext} [K] es la temperatura del aire exterior, y h_{in} [$W/(m^2 \cdot K)$] es el coeficiente de transferencia térmica total en el interior.

La principal diferencia que presenta el método termométrico con respecto al método promedio de la ISO 9869-1 es que no necesita medir el flujo de calor del cerramiento. Así pues, el método termométrico no tiene asociados los errores de medición debidos al uso del termoflujómetro que han sido reportados por diversos autores (19-25) al utilizar el método promedio de la ISO 9869-1. Peng y Wu (24) determinaron que la mayor causa de dispersión en los resultados de la ISO 9869-1 es debida al flujo de calor medido durante el ensayo. En este sentido, Cesaratto et al. (19), Desogus et al. (22) y Trethowen (25) determinaron que la

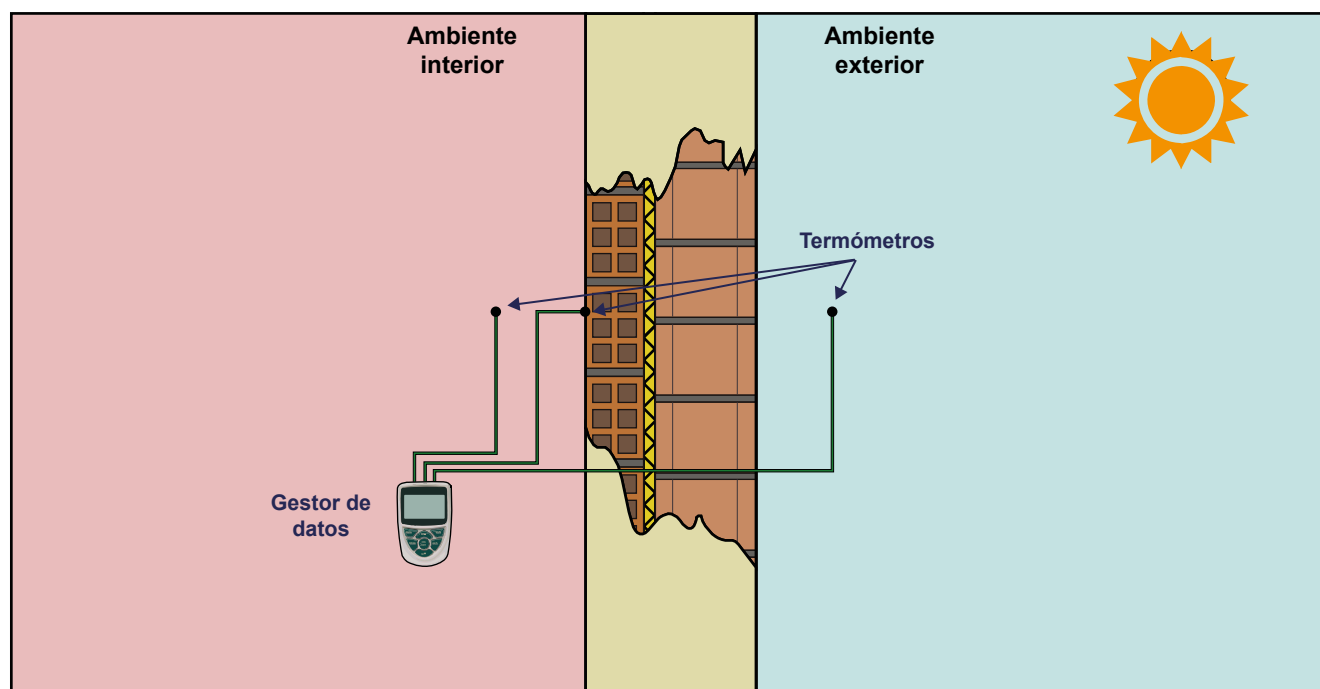


Figura 1. Esquema de medición del método termométrico.

colocación del termoflujómetro provoca una alteración en el flujo de calor del cerramiento, provocando la obtención de resultados no representativos. Además, el error asociado a la colocación del termoflujómetro es elevado. De acuerdo con esto, en los estudios realizados por Cucumo et al. (20,21) se ha cuantificado la influencia que tiene la colocación de la placa en el muro, con deflexiones que pueden ser de hasta un 30%. Otra aproximación a esta cuestión fue realizada por Meng et al. (23) al establecer que el error máximo puede ser de hasta un 26% debido a la colocación del termoflujómetro mientras que al utilizar métodos de temperatura superficial (como el método termométrico) el error máximo fue de un 6%.

Estas ventajas que tiene el método termométrico por la no medición del flujo de calor ha generado que tenga un gran uso a nivel profesional (18). Sin embargo, el desarrollo científico del método ha sido escaso hasta los últimos años en los que han surgido diversos estudios. El primero de ellos fue realizado por Andújar Márquez et al. (26). En este estudio, los autores desarrollaron una metodología específica de determinación de la transmitancia térmica utilizando las bases del método termométrico que existían a través de las recomendaciones de los fabricantes de los equipos de medición y aplicándola a un caso de estudio determinado. Bienvenido-Huertas et al. (18) aplicaron el método termométrico a 8 casos de estudio de diferentes períodos constructivos en diferentes estaciones del año en regiones del sur de España. Los autores determinaron las limitaciones del método en función del gradiente térmico y comparando los resultados obtenidos a través de dos equipos diferentes. En un estudio posterior, Bienvenido-Huertas et al. (27) analizaron la utilización de redes neuronales artificiales para realizar correcciones por almacenamiento de calor en el elemento analizado. Finalmente, Kim et al. (28) estudiaron el empleo del método termométrico en 4 casos de estudio de más de 25 años de antigüedad antes y después de incorporarles aislamiento térmico en una región climática fría. Los resultados mostraron que la tasa de desviación existente entre el método promedio de la ISO 9869-1 y el método termométrico fue en todo momento inferior al 3,5%, lo que destaca la exactitud que se puede obtener con el método.

A pesar del avance que ha presentado el método en materia de investigación, existen disparidad en torno a dos aspectos: el tipo de análisis de los datos y el coeficiente de transferencia térmica total en el interior utilizado.

Con respecto al tipo de análisis de los datos, mientras que Bienvenido-Huertas et al. (18) consideraron las mediciones obtenidas como medidas instantáneas a las que se les realiza un filtrado y se obtiene la media aritmética de los datos filtrados de forma similar a los métodos cuantitativos mediante termografía infrarroja (Ecuaciones [4] y [5]), Kim et al. (28) y Andújar Márquez et al. (26) consideraron la formulación como la suma ponderada de las medidas obtenidas durante la monitorización (Ecuación [3]). Además, existen diferentes en cuanto al tipo de denominador que se debe utilizar en la formulación. En este sentido, Andújar Márquez et al. (26) utilizaron el valor absoluto del denominador de la Ecuación [3] para poder obtener resultados válidos en todo momento (independientemente de si la temperatura exterior era mayor o menor a la interior), mientras que Kim et al. (28) no considera que el denominador tenga valor absoluto.

$$[4] \quad U = \frac{h_{in}(T_{in} - T_{s,in})}{T_{in} - T_{ext}}$$

$$[5] \quad \bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_j$$

Donde U_j [W/(m²·K)] es el valor de transmitancia térmica obtenida a través de la Ecuación [4] para una determinada instancia j , y n es el número total de instancias filtradas.

Finalmente, los valores utilizados para el coeficiente de transferencia térmica total en el interior también son motivos de discrepancia entre las diferentes investigaciones. Por un lado, Bienvenido-Huertas et al. (18) y Kim et al. (28) utilizaron la inversa del valor de la resistencia térmica superficial interior establecido en la ISO 6946 para un flujo horizontal (7,69 W/(m²·K)), mientras que, por otro lado, Andújar Márquez et al. (26) utilizaron el valor dado en dicha norma para el coeficiente convectivo (2,5 W/(m²·K)), de manera que descartaron el uso del coeficiente de radiación. Además de esto, la aplicabilidad de los valores tabulados dados en la ISO 6946 también debería ser analizado, ya que existe en la literatura científica una amplia variedad de correlaciones para el coeficiente de convección que también podrían ser aplicadas. Igualmente, las recomendaciones de filtrar los datos obtenidos en otros métodos de evaluación (como, por ejemplo, en la ISO 9869-1 (19,29)) debería ser analizada para el método termométrico, ya que solo una de las investigaciones consideró este aspecto al analizar los datos (18).

Debido a las discrepancias existentes en las investigaciones del método termométrico, se plantea como objetivo de esta investigación estudiar el planteamiento de análisis de datos más adecuado para el método. Más concretamente, el estudio se fundamenta en el análisis de dos aspectos: el coeficiente de convección y el tipo de formulación. Para ello, se aplicó el método termométrico conforme a sus requerimientos operacionales en 20 cerramientos.

2. VALORES TABULADOS Y CORRELACIONES PARA EL COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO CONSIDERADOS EN LA INVESTIGACIÓN

La ISO 6946 (30) establece que el coeficiente total de transferencia de calor en el interior es la suma de los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación (Ecuación [6]).

$$[6] \quad h_{in} = h_{c,in} + h_{r,in}$$

Donde $h_{c,in}$ [W/(m²·K)] es el coeficiente de transferencia de calor por convección, y $h_{r,in}$ [W/(m²·K)] es el coeficiente de transferencia de calor por radiación. $h_{r,in}$ puede ser obtenido mediante la relación de la emisividad de la superficie de un objeto y el coeficiente de transferencia de calor de un cuerpo negro a la misma temperatura que se encuentra la superficie analizada (30). Dado que la temperatura interior será de aproximadamente 20°C durante los ensayos (18,28) y dado que la emisividad de los materiales de acabado oscila entre 0,90-0,96 (31), se puede considerar que el valor de 5,19 W/(m²·K) establecido en la ISO 6946 es representativo con las condiciones típicas de ensayo y con los valores de emisividad de los materiales de construcción (30). Esto permite

determinar la transmitancia térmica con el método termométrico sin necesidad de caracterizar variables del componente de radiación, tales como la emisividad o la temperatura aparente reflejada (32).

La otra variable que permite determinar el coeficiente total de transferencia de calor es el término convectivo. Como ya se ha comentado, existe en la literatura científica una amplia variedad de expresiones para el coeficiente interior de convección que pueden ser utilizadas a efectos de formulación para el método termométrico. Para este estudio se analizan tanto el valor teórico para el término convectivo indicado en la ISO 6946 para flujo horizontal (2,5 W/(m²·K)), como las aproximaciones experimentales que vienen recogidas en las siguientes publicaciones y documentos: (i) ISO 9869-1; (ii) Alamdari y Hammond (33); (iii) Churchill y Chu (34); (iv) Holman (35); (v) Fohanno y Polidori (36); (vi) Earle (37); (vii) Giesecke (38); (viii) Khalifa y Marshall (39); y (ix) Wilkes y Peterson (40).

La ISO 9869-1 (41) establece que el valor teórico para el coeficiente de convección en superficies verticales es de 3,0 W/(m²·K), aunque dicho valor puede variar cerca de ciertos elementos como ventanas o calentadores. El valor de la ISO 9869-1 fue utilizado en algunas investigaciones de caracterización térmica. Tal es el caso del estudio realizado por Tejedor et al. (42) al comparar los resultados obtenidos por el método propuesto por los autores para calcular el coeficiente de convección con el valor de la ISO 9869-1.

Sin embargo, hay una mayor predominancia de estudios que plantean aproximaciones experimentales para el término convectivo. Un ejemplo de ello fue el estudio realizado por Alamdari y Hammond (33). En su trabajo, los autores desarrollaron una expresión para el coeficiente de convección interno de cerramientos ubicados en locales ventilados de manera natural bajo flujo laminar y turbulento (Ecuación [7]). Para ello, utilizaron la correlación propuesta por Churchill y Usagi (43) y fue diseñada para todas las posibles opciones de los números de Prandtl y Rayleigh. Se trata de una correlación utilizada en algunos estudios comparativos, como el realizado por Evangelisti et al. (44).

$$[7] \quad h_{c,in} = \left\{ \left[1.5 \left(\frac{T_{in} - T_{s,in}}{L} \right)^{1/4} \right]^6 + \left[1.23 (T_{in} - T_{s,in})^{1/3} \right]^6 \right\}^{1/6}$$

Donde L [m] es la altura del muro.

Otro propuesta diferente para todo el rango de números de Prandtl y Rayleigh fue realizada por Churchill y Chu (34). En sus estudios plantearon una formulación para el coeficiente de convección natural de elementos verticales (Ecuación [8]), aunque en este caso la ecuación difiere bastante de la propuesta por Alamdari y Hammond.

$$[8] \quad h_{c,in} = \frac{0.0257}{L} \left(0.825 + 7.01 (T_{in} - T_{s,in})^{1/6} L^{3/6} \right)^2$$

Por otro lado, Holman (35) (Ecuación [9]), Fohanno y Polidori (36) (Ecuación [10]) y Earle (37) (Ecuación [11]) desarrollaron correlaciones específicas para superficies internas de elementos verticales uniformemente calentadas.

$$[9] \quad h_{c,in} = 1.42 \left(\frac{T_{in} - T_{s,in}}{L} \right)^{1/4}$$

$$[10] \quad h_{c,in} = 1.332 \left(\frac{T_{in} - T_{s,in}}{L} \right)^{1/4}$$

$$[11] \quad h_{c,in} = 1.31 \left(\frac{T_{in} - T_{s,in}}{L} \right)^{1/4}$$

Finalmente, Giesecke (38) (Ecuación [12]), Khalifa y Marshall (39) (Ecuación [13]) y Wilkes y Peterson (40) (Ecuación [14]) propusieron ecuaciones similares a la de Holman y a la de Earle, pero sin considerar una dimensión característica.

$$[12] \quad h_{c,in} = 2.5 (T_{in} - T_{s,in})^{1/4}$$

$$[13] \quad h_{c,in} = 2.03 (T_{in} - T_{s,in})^{0.14}$$

$$[14] \quad h_{c,in} = 3.05 (T_{in} - T_{s,in})^{0.12}$$

Todos estos valores y aproximaciones para el coeficiente de convección fueron utilizados en este estudio para determinar la expresión que mejor se ajuste para el método termométrico. Considerando que el coeficiente de radiación puede adoptar un valor de 5,19 W/(m²·K), se pueden plantear diferentes posibilidades para el método en función únicamente del coeficiente convectivo. Por este motivo, la formulación teórica de este estudio utiliza el esquema de la Ecuación [15]. En la Tabla 1 se representan las expresiones de transmitancia térmica para cada expresión.

$$[15] \quad U = \frac{(h_{c,in} + 5,19)(T_{in} - T_{s,in})}{T_{in} - T_{ext}}$$

3. METODOLOGÍA Y CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El marco metodológico de la presente investigación se estableció mediante el flujo de trabajo de la Figura 2.

FLUJO DE TRABAJO
Paso 1. Selección de los casos de estudio a analizar. - Selección de una muestra representativa de casos de estudio. - Análisis de heterogeneidades térmicas mediante la ISO 6781. - Recopilación documental de datos relativos a las características constructivas de la fachada.
Paso 2. Preparación de la campaña experimental y mediciones in situ. - Selección e instalación de los equipos de medición. - Comprobación de la estimación meteorológica en el período de ensayo. - Medición del cerramiento.
Paso 3. Post-procesado y análisis de los datos utilizando los diferentes planteamientos de la investigación.
Paso 4. Conclusiones.

Figura 2. Flujo de trabajo de la investigación.

En primer lugar, se seleccionó una muestra representativa de viviendas de diferentes períodos constructivos. La muestra seleccionada se determinó a través de los siguientes factores: la localidad de la vivienda, el año de construcción, la normativa técnica que se aplicó durante su diseño y ejecución, el estado de conservación y si disponía de fachadas orientadas hacia el norte. Asimismo, para todos los cerramientos se disponía de documentación técnica que permitió estimar con exactitud la composición del cerramiento y determinar la transmitancia térmica según la ISO 6946. Además, se ana-

Tabla 1. Ecuaciones de transmitancia térmica para el método termométrico analizadas en la investigación

Expresiones de transmitancia térmica	
[16]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n (2.5 + 5.19)(T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[17]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n (3 + 5.19)(T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[18]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\left\{ \left[1.5 \left(\frac{T_{in,j} - T_{s,in,j}}{L} \right)^{1/4} \right]^6 + \left[1.23 (T_{in,j} - T_{s,in,j})^{1/3} \right]^6 \right\}^{1/6} + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[19]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{0.0257}{L} \left(0.825 + 7.01 (T_{in,j} - T_{s,in,j})^{1/6} L^{3/6} \right)^2 + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[20]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(1.42 \left(\frac{T_{in,j} - T_{s,in,j}}{L} \right)^{1/4} + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[21]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(1.332 \left(\frac{T_{in,j} - T_{s,in,j}}{L} \right)^{1/4} + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[22]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(1.31 \left(\frac{T_{in,j} - T_{s,in,j}}{L} \right)^{1/4} + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[23]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(2.5 (T_{in,j} - T_{s,in,j})^{1/4} + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[24]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(2.03 (T_{in,j} - T_{s,in,j})^{0.14} + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$
[25]	$U = \frac{\sum_{j=1}^n \left(3.05 (T_{in,j} - T_{s,in,j})^{0.12} + 5.19 \right) (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})}$

lizó previamente el adecuado estado de los muros a analizar, aplicando la ISO 6781 para evaluar si presentaban heterogeneidades térmicas, utilizando una cámara infrarroja marca FLIR modelo E60bx. En total se analizaron 20 casos de estudio diferentes, con el objetivo de analizar una muestra representativa y numerosa. Estos casos de estudio pertenecen a los tres períodos constructivos más representativos del parque inmobiliario en España: anterior a la NBE-CT 79 (45), posterior a la NBE-CT 79 y anterior al Código Técnico de la Edificación (CTE) (46), y posterior al CTE. La distribución de los casos de estudio por cada período constructivo fue la siguiente: 7 pertenecían al período constructivo 1, 9 al período 2, y 4 al período 3. Estos casos se encontraban ubicados en el sur de España, más concretamente, en las ciudades de Cádiz y de Sevilla. El diseño de todos los casos era de doble hoja de ladrillo con cámara de aire. Los casos de los períodos 2 y 3 disponían de material aislante.

Para la realización de los ensayos se utilizó un gestor de datos ALMEMO 2590-4AS con termopares T 190-2 (ver Tabla 2). Las sondas se colocaron según los siguientes criterios (47): (i)

3 sensores de temperatura superficial interior se colocaron a una altura de 1,5 m, con una separación de 15 cm y adheridas mediante un adhesivo conductor de calor. Además, se colocaron a una distancia de 20 mm con respecto a las juntas de mortero de las piezas de la capa interior que se determinó mediante el análisis con termografía infrarroja desde el interior; y (ii) los termopares para medir la temperatura ambiental se colocaron a una altura de 1,5 m y separados horizontalmente del cerramiento en 30 cm para evitar efectos convectivos. También es conveniente destacar que el cerramiento analizado fue el que tuviera orientación norte para evitar la distorsión generada en los resultados por la radiación directa. Para garantizar un gradiente térmico adecuado se utilizó un equipo de calefacción portátil al que se le acopló un termostato regulable digital. El termostato fue regulado con una temperatura de 20°C. Asimismo, la previsión meteorológica previo a los ensayos y la utilización de una estación meteorológica portátil PCE-FWS20 (ver Tabla 2), garantizó que los ensayos fueran realizados cuando la velocidad del viento fuera inferior a 1 m/s y cuando no hubiera precipitaciones. La duración de los ensayos fue de 72 horas conforme a los criterios recogi-

dos para el método termométrico, abarcando, por tato, tanto periodos de día como de noche. El intervalo de adquisición de medidas fue de 15 minutos.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los equipos y sondas utilizados

Equipo/sonda	Variable	Rango	Resolución	Exactitud
ALMEMO 2590-4AS con termopar T 190-2	Temperatura	-10 – 105 °C	0,1 K	±0,05 K ±0,05 %
Estación meteorológica PCE-FWS20	Temperatura	-40 – 65 °C	0,1 °C	±1 °C
	Velocidad del viento	0 – 180 km/h	0,07 m/s	±10%

Finalmente, el post-procesado y análisis de los datos fue realizado a través del lenguaje de programación R. Los resultados fueron obtenidos utilizando dos planteamientos diferentes: planteamiento 1 donde los resultados de transmitancia térmica se obtienen de la media del sumatorio del numerador y del denominador (Ecuación [3]), y planteamiento 2, donde los resultados de transmitancia térmica se obtienen del promedio de las medidas instantáneas (Ecuaciones [4] y [5]). En cada uno de estos planteamientos se utilizaron las diferentes ecuaciones propuestas de la Tabla 1 (Ecuaciones [16]-[25]). Asimismo, debido a las recomendaciones de diversos autores de filtrar los datos cuando existe un gradiente térmico elevado (18,19,29), en este estudio antes de la obtención de los resultados se analizó el filtrado de datos necesario que permitiera optimizar el grado de ajuste de los resultados con el valor de referencia. Debido a las desviaciones en los resultados que pueden darse por la utilización de un filtrado de 5 °C y las dificultades para alcanzar registros con un gradiente de 15 °C, en este estudio se consideraron dos criterios de gradiente térmico: 7°C y 15°C.

Para determinar la validez de los resultados obtenidos por los diferentes planteamientos para el método termométrico se utilizó el criterio de la ISO 9869-1. Este criterio considera que se puede considerar como resultados representativos de los métodos experimentales aquellos que tienen una desviación porcentual (σ) inferior al 20% entre el valor teórico la ISO 6946 (U_{6946}) y el obtenido experimentalmente (U_{MT}):

$$[26] \quad \sigma = \frac{U_{MT} - U_{6946}}{U_{6946}}$$

El valor de la ISO 6946 se obtuvo mediante la Ecuación [27]. Es importante destacar que para los valores de conductividad térmica se utilizó la metodología propuesta por Pérez-Bella et al. (49). Esta metodología está basada en las desviaciones que puede presentar la conductividad térmica extraída de catálogos y documentos oficiales (como el Catálogo de Elementos Constructivos (48)) por las características climáticas existentes en la zona donde se encuentra el edificio. Para evitar esta variación, Pérez-Bella et al. (49) diseñaron factores de corrección para cada una de las principales ciudades de España que ponderan el valor de conductividad térmica (ver Ecuación [28]). Con estas correcciones se pudieron obtener los valores de transmitancia térmica de referencia de cada caso de estudio (ver Figura 3).

$$[27] \quad U_{Estimated} = \frac{1}{R_{s,in} + \sum \frac{e_i}{\lambda_{i,CCF}} + R_{s,ext}}$$

$$[28] \quad \lambda_{CCF} = \lambda \cdot CCF$$

Donde en el cual $\lambda_{i,CCF}$ [W/(mK)] es la conductividad térmica corregida de cada una de las capas del cerramiento utilizando el planteamiento de Pérez-Bella et al. (49); e_i [m] es el espesor de cada una de las capas del cerramiento; $R_{s,in}$ y $R_{s,ext}$ [(m²K)/W] son las resistencias térmicas superficiales interior y exterior, respectivamente, obtenidas a través de valores tabulados de la ISO 6946; y CCF [adimensional] es el factor de corrección de la conductividad térmica (en Sevilla tiene un valor de 1,0385 y en Cádiz tiene un valor de 1,0403).

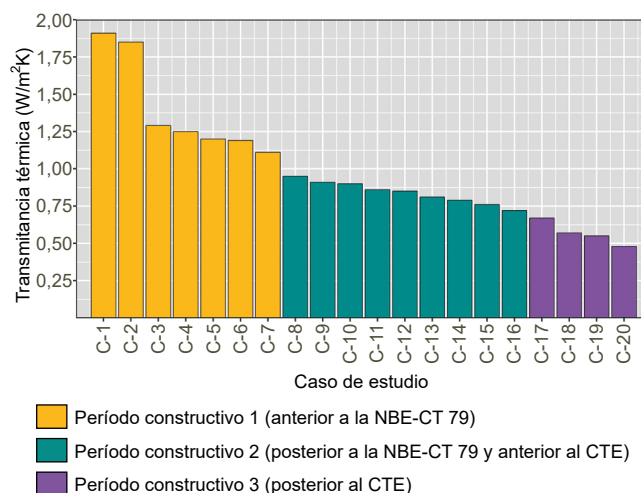


Figura 3. Valores de referencia de transmitancia térmica para cada uno de los casos de estudio analizados.

4. RESULTADOS

4.1. Post-procesado de datos utilizado

En primer lugar, se analizó el procedimiento de filtrado de datos más adecuado para la obtención de resultados representativos. En la literatura científica, sólo en la publicación de Bienvenido-Huertas et al. [18] se hace referencia a la necesidad de filtrar los datos con gradientes de temperatura. Por este motivo, se decidió determinar el gradiente térmico que se debe considerar en el post-procesado de los datos para obtener los resultados más representativos. Tal y como se puede apreciar en las Figuras 4 y 5, en el planteamiento 1 (suma ponderada) la consideración de un filtrado de 7 ó 10°C da lugar a resultados similares con diferencias inferiores a 0,05 W/(m²K) en el valor de transmitancia térmica. Asimismo, la no utilización de un procedimiento de filtrado puede conllevar a desviaciones superiores a 0,3 W/(m²K) al final del ensayo. La misma tendencia se detecta en el caso del planteamiento 2. Tal y como se puede apreciar en las figuras, las medidas instantáneas de transmitancia térmica con un diferencial de temperaturas inferior a 5 °C presentaron una gran dispersión en las nubes de puntos, con desviaciones superiores a 10 W/(m²K). Sin embargo, a partir de diferencias superiores a 7 °C se puede comprobar un mayor índice de repetibilidad en resultados representativos. Así pues, tanto un filtrado de 7 °C como de 10 °C conduce a la obtención de resultados más

representativos que en los procedimientos de análisis sin filtrado de datos. Asimismo, dado que la utilización de un filtrado con un gradiente térmico elevado suele conducir a la obtención de resultados más ajustados (19), las condiciones climáticas exteriores pueden provocar que el número de datos con dicho gradiente sea bajo, lo que puede desembocar en la obtención de resultados menos representativos (es decir, con desviaciones inferiores al 20% con respecto al valor de referencia) que los que se pueda obtener con subconjuntos de datos mayores. En este sentido, en el caso de la Figura 5, el número de datos filtrado se reduce a más del 85% si se utiliza un filtrado de 10°C. Esta tendencia fue similar en el resto de los casos de estudio. Por este motivo, se decidió utilizar un filtrado de los datos con un gradiente térmico de 7°C.

4.2. Resultados obtenidos con el planteamiento 1

Realizado este análisis previo, se procedió a obtener los resultados de transmitancia térmica para cada uno de los planteamientos utilizando un filtrado de 7 °C. En primer lugar, se

procedió al análisis del planteamiento 1. En la Tabla 3 se indican los resultados de transmitancia térmica obtenidos para cada caso de estudio y utilizando las diferentes ecuaciones de transmitancia térmica. Asimismo, las desviaciones porcentuales entre los valores de referencia y los valores obtenidos con el método termométrico son recogidas en la Figura 6. Tal y como se puede apreciar, el planteamiento obtuvo resultados representativos en 13 de los casos de estudio analizados (es decir, resultados con una desviación menor al 20% con respecto al valor de referencia). Los resultados no representativos se obtuvieron en casos de estudio de los tres períodos constructivos, por lo que no se detectó que esta limitación del planteamiento pudiera deberse a características propias de los cerramientos de cada período, como la utilización de material aislante. Asimismo, con respecto a las diferentes expresiones teóricas analizadas, se puede apreciar como las Ecuaciones [18]-[22] obtuvieron resultados representativos entre 10 y 12 casos de estudios. Estos resultados presentaron diferencias con respecto al valor teórico para el término convectivo de la ISO 6946 (Ecuación [16]), con resultados representativos en 8 de los ca-

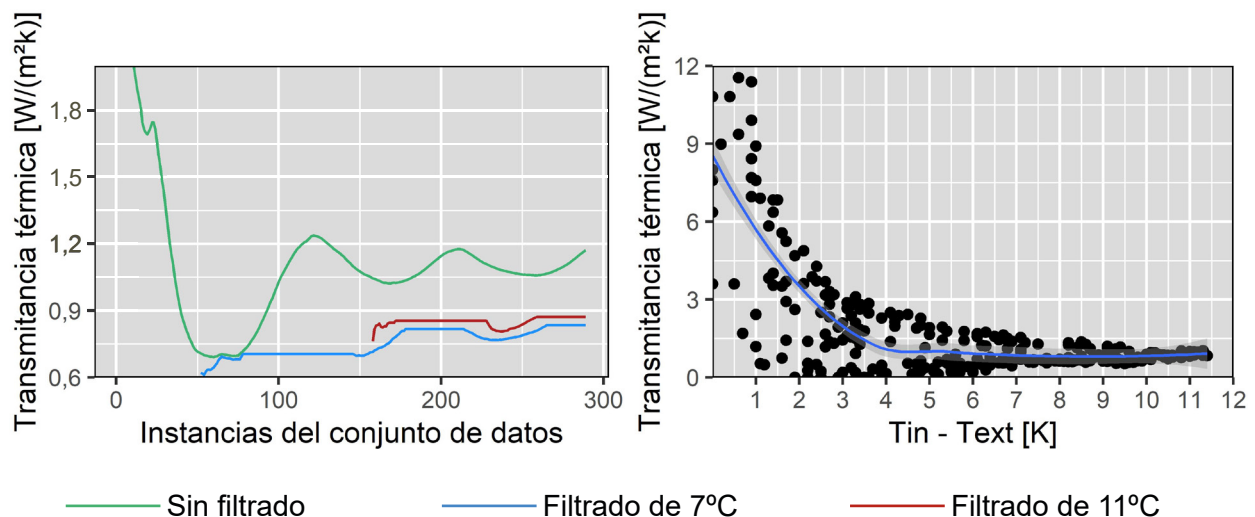


Figura 4. Filtrado de datos en el conjunto de datos obtenido en C-8. Resultados utilizando la Ecuación [22]. A la izquierda se muestran los resultados obtenidos con la suma ponderada de los datos filtrados (planteamiento 1) y a la derecha la nube de puntos para visualizar el resultado de la media aritmética de los datos instantáneos (planteamiento 2).

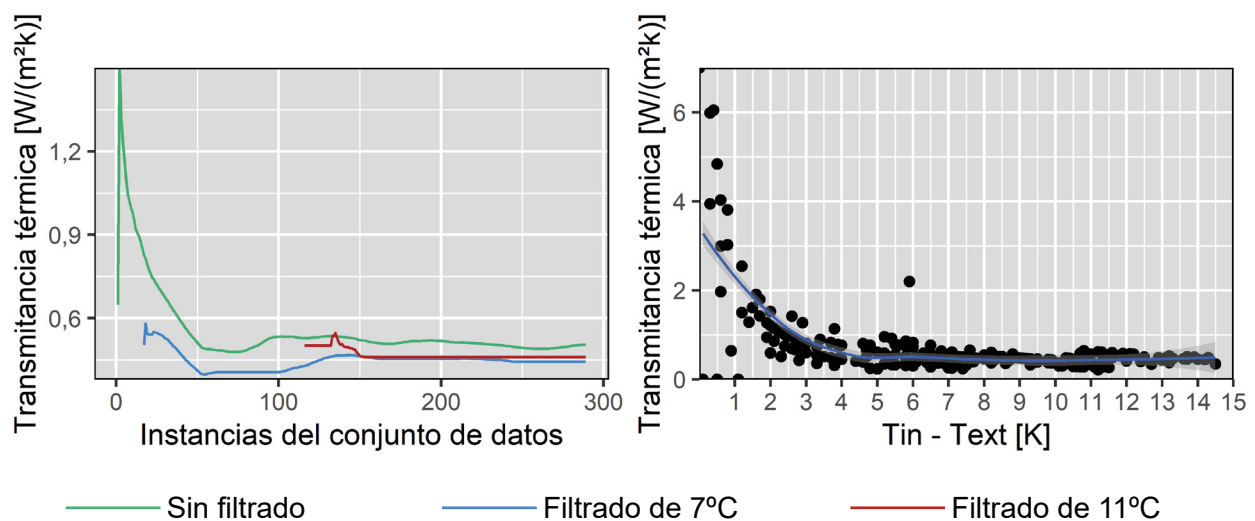


Figura 5. Filtrado de datos en el conjunto de datos obtenido en C-19. Resultados utilizando la Ecuación [22]. A la izquierda se muestran los resultados obtenidos con la suma ponderada de los datos filtrados (planteamiento 1) y a la derecha la nube de puntos para visualizar el resultado de la media aritmética de los datos instantáneos (planteamiento 2).

tos de estudio. En este sentido, se puede apreciar como la Ec. (16) solo presentó similitud con la ecuación adaptada para el método utilizando la correlación de Khalifa y Marshall, aunque en todo momento hubo diferencias superiores a 0,04 W/(m²K). El resto de las ecuaciones presentaron comportamientos

diferentes entre sí, salvo los siguientes pares de ecuaciones: (i) las Ecuaciones [21] y [22], correspondientes a las correlaciones de Fohanno y Polidori y de Earle; y (ii) las Ecuaciones [17] y [25], correspondientes al valor tabulado de la ISO 9869-1 y a la correlación de Wilkes y Peterson.

Tabla 3. Resultados de transmitancia térmica obtenido de la media del sumatorio del numerador y del denominador.

Caso de estudio	Transmitancia térmica [W/(m ² K)]									
	Ec. [16]	Ec. [17]	Ec. [18]	Ec. [19]	Ec. [20]	Ec. [21]	Ec. [22]	Ec. [23]	Ec. [24]	Ec. [25]
C-1	3,31	3,53	2,96	3,12	2,85	2,81	2,8	3,66	3,25	3,55
C-2	2,04	2,18	1,78	1,86	1,72	1,7	1,69	2,17	1,97	2,15
C-3	1,81	1,92	1,57	1,64	1,52	1,5	1,49	1,92	1,75	1,9
C-4	2,27	2,42	1,98	2,08	1,92	1,9	1,89	2,43	2,2	2,4
C-5	1,32	1,4	1,11	1,15	1,08	1,07	1,07	1,33	1,25	1,35
C-6	1,43	1,52	1,21	1,25	1,18	1,16	1,16	1,46	1,35	1,47
C-7	1,39	1,47	1,17	1,22	1,14	1,13	1,13	1,41	1,32	1,43
C-8	1,07	1,14	0,89	0,94	0,87	0,84	0,86	1,06	1	1,1
C-9	0,98	1,07	0,93	0,96	0,91	0,89	0,9	1,03	0,93	1,02
C-10	1,06	1,14	0,89	0,93	0,88	0,86	0,86	1,07	1	1,09
C-11	1,17	1,24	0,98	1,01	0,96	0,95	0,95	1,18	1,1	1,2
C-12	1,39	1,48	1,19	1,21	1,12	1,18	1,16	1,39	1,28	1,4
C-13	1,19	1,26	0,99	1,04	0,97	0,94	0,96	1,19	1,12	1,23
C-14	1,37	1,46	1,16	1,2	1,13	1,17	1,11	1,39	1,3	1,41
C-15	0,76	0,81	0,65	0,67	0,63	0,62	0,62	0,77	0,72	0,78
C-16	1,21	1,29	1,02	1,06	0,99	0,99	0,98	1,23	1,15	1,25
C-17	1,05	1,12	0,88	0,91	0,86	0,85	0,85	1,05	0,98	1,07
C-18	0,57	0,61	0,47	0,48	0,46	0,45	0,45	0,55	0,53	0,57
C-19	0,44	0,47	0,35	0,36	0,35	0,34	0,34	0,41	0,4	0,43
C-20	0,17	0,19	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,17

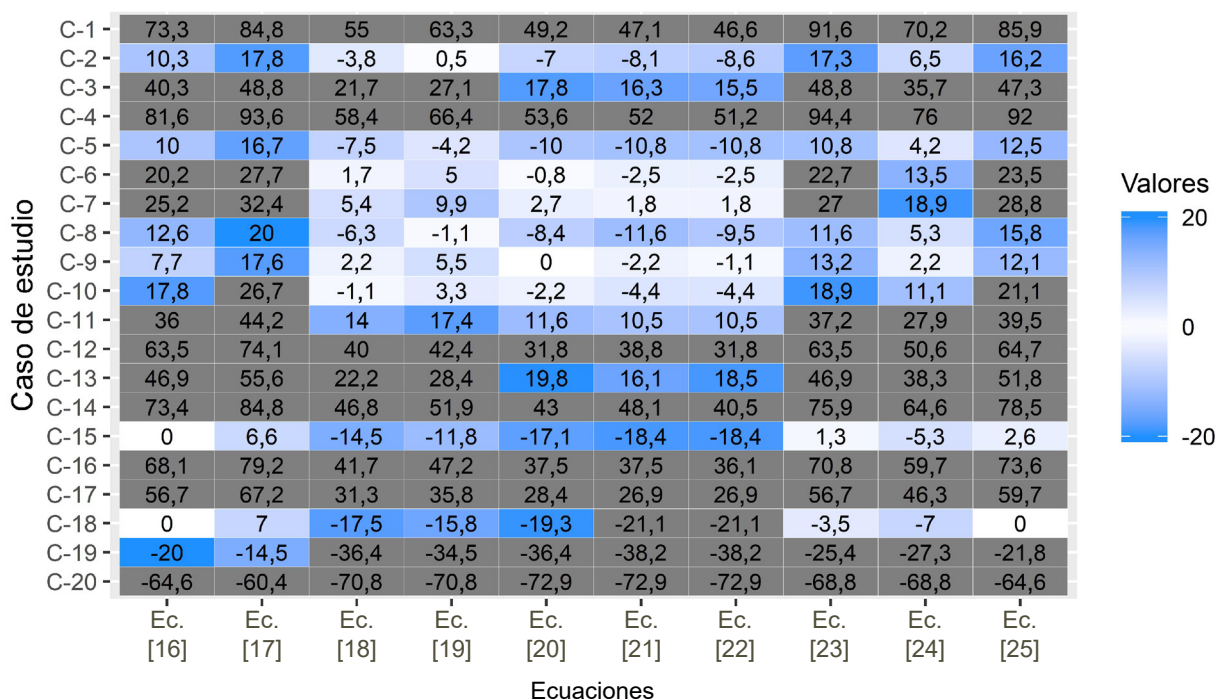


Figura 6. Desviación porcentual entre los valores de referencia y los valores medidos con el planteamiento 1.

4.3. Resultados obtenidos con el planteamiento 2

Con respecto al planteamiento 2, se ha analizado los mismos aspectos del planteamiento 1. En primer lugar, se obtuvo el resultado de transmitancia térmica para cada ecuación (ver Ta-

bla 4) y se realizó el análisis de resultados obtenidos con una desviación porcentual inferior al 20% con respecto al valor de referencia (ver Figura 7). Las diferentes ecuaciones analizadas con este planteamiento permitieron obtener resultados representativos en 19 de los 20 casos de estudio. Sólo C-20 obtuvo

Tabla 4. Resultados de transmitancia térmica obtenido de la media aritmética de las medidas instantáneas.

Caso de estudio	Transmitancia térmica [W/(m ² K)]									
	Ec. [16]	Ec. [17]	Ec. [18]	Ec. [19]	Ec. [20]	Ec. [21]	Ec. [22]	Ec. [23]	Ec. [24]	Ec. [25]
C-1	1,67	1,77	1,44	1,50	1,40	1,38	1,37	1,75	1,60	1,75
C-2	1,98	2,10	1,72	1,80	1,66	1,64	1,63	2,09	1,91	2,09
C-3	1,79	1,91	1,56	1,63	1,51	1,49	1,48	1,90	1,73	1,89
C-4	1,74	1,85	1,51	1,57	1,46	1,44	1,43	1,83	1,67	1,83
C-5	1,40	1,49	1,19	1,23	1,16	1,14	1,14	1,43	1,33	1,45
C-6	1,31	1,39	1,11	1,14	1,08	1,06	1,06	1,33	1,24	1,35
C-7	0,93	0,99	0,79	0,82	0,77	0,76	0,75	0,95	0,88	0,96
C-8	0,91	0,97	0,76	0,78	0,74	0,73	0,73	0,91	0,85	0,93
C-9	0,89	0,95	0,74	0,77	0,73	0,72	0,71	0,89	0,84	0,81
C-10	0,93	0,99	0,78	0,80	0,76	0,75	0,74	0,93	0,87	0,85
C-11	1,08	1,15	0,91	0,95	0,89	0,88	0,87	1,10	1,02	1,11
C-12	1,07	1,14	0,90	0,93	0,88	0,87	0,86	1,08	1,01	1,09
C-13	1,01	1,08	0,85	0,88	0,83	0,82	0,81	1,01	0,95	1,03
C-14	1,04	1,11	0,87	0,90	0,85	0,84	0,83	1,05	0,97	1,06
C-15	0,74	0,79	0,62	0,64	0,60	0,60	0,59	0,75	0,70	0,76
C-16	0,98	1,04	0,82	0,85	0,80	0,79	0,79	0,98	0,92	1,01
C-17	0,85	0,91	0,71	0,73	0,69	0,69	0,68	0,85	0,80	0,87
C-18	0,57	0,61	0,47	0,48	0,46	0,46	0,45	0,56	0,53	0,58
C-19	0,55	0,58	0,45	0,46	0,44	0,43	0,43	0,53	0,51	0,55
C-20	0,18	0,19	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,16	0,16	0,17

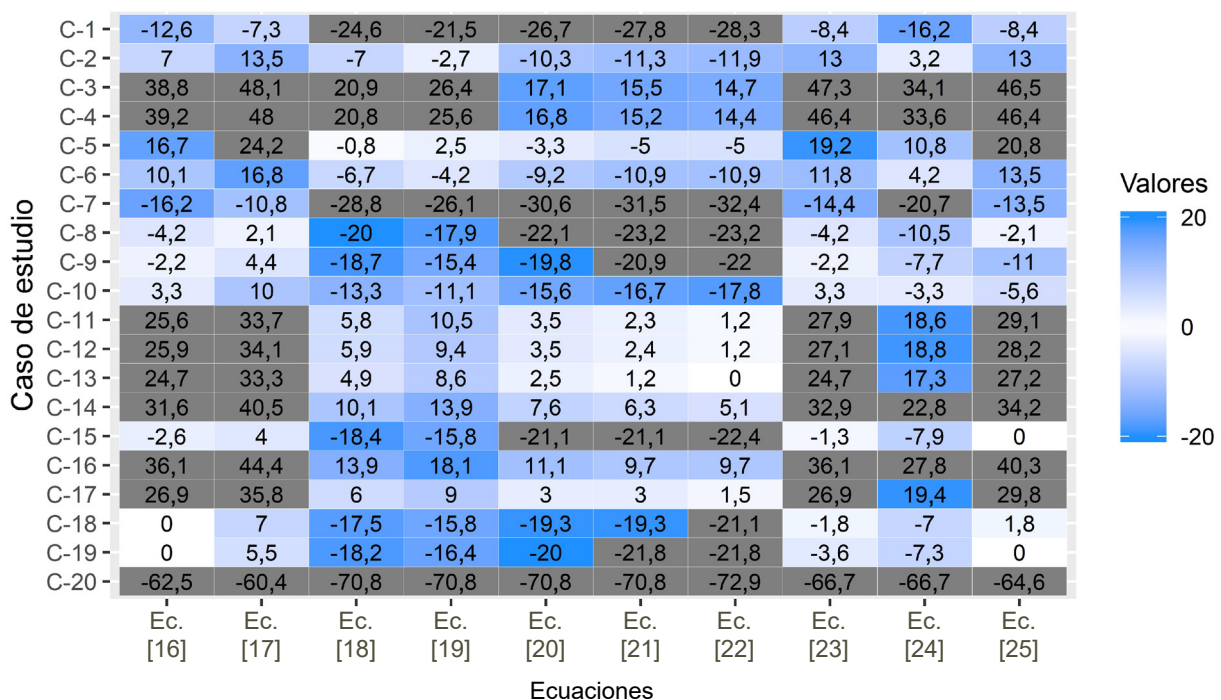


Figura 7. Desviación porcentual entre los valores de referencia y los valores medidos con el planteamiento 2.

resultados atípicos en todas las ecuaciones. Esto puede ser atribuido a las propias características del cerramiento, con un aislamiento térmico elevado (el valor de transmitancia térmica de referencia era el más bajo de los analizados, con un valor de 0,48 W/(m²K)). Asimismo, todas las ecuaciones planteadas en este estudio tuvieron un buen rendimiento con el planteamiento 2, con un número de resultados representativos igual o superior al 50% de los casos analizados. En este sentido, el valor tabulado para el coeficiente de convección de la ISO 6946 obtuvo resultados representativos en 11 de los casos analizados, aunque su número fue inferior al obtenido por correlaciones experimentales del término convectivo, como la de Alamdari y Hammond (Ecuación [18]), la de Churchill y Chu (Ecuación [19]) y la de Holman (Ecuación [20]).

4.4. Planteamiento 1 vs planteamiento 2

Con respecto a que enfoque y término convectivo permite obtener un mejor rendimiento con el método termométrico, se ha podido observar en los subapartados anteriores como cada planteamiento obtuvo resultados diferentes. En líneas generales, el planteamiento 1 generó que los resultados obtenidos fueran superiores a los del planteamiento 2 en casi todos los casos de estudio, con un incremento medio de 0,28 W/(m²K) y sólo en C-5, C-18, C-19 y C-20, el resultado obtenido fue más bajo, con una disminución media de 0,05 W/(m²K). Esto generó que el número de resultados representativos obtenidos por el planteamiento 1 fuera más bajo que en el planteamiento 2 (ver Figura 8). En este sentido, la utiliza-

ción del planteamiento 2 permitió mejorar el rendimiento del método termométrico, consiguiendo un aumento en los resultados representativos entre 1 y 5. Con respecto a las ecuaciones del método termométrico que mejores resultados obtuvieron, tal y como se ha comentado en el subapartado 4.3., la utilización de las correlaciones de Alamdari y Hammond, de Churchill y Chu, y de Holman fueron las que lograron un mejor rendimiento. Por lo tanto, la utilización de estas ecuaciones permitió incrementar el número de casos representativos en 4 con respecto al planteamiento clásico del método (la utilización del valor tabulado de 2,5 de la ISO 6946). Esto supone una nueva posibilidad de aplicación del método y de desarrollo de nuevas investigaciones, al reflejar la posibilidad de utilizar expresiones experimentales en el término convectivo para optimizar los resultados de transmitancia térmica.

5. CONCLUSIONES

En este estudio, se realizó un análisis para la optimización del método termométrico debido a las diferencias existentes en la literatura científica en relación con tres aspectos: planteamiento de formulación, ecuación para el coeficiente de transferencia de calor total y post-procesado de los datos. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de monitorizaciones de 20 cerramientos diferentes, se pudo concluir que la utilización del planteamiento 2 (transmitancia térmica obtenido de la media aritmética de las medidas instantáneas) tuvo un mejor comportamiento que los resultados obtenidos con el planteamiento 1 (transmitancia térmica

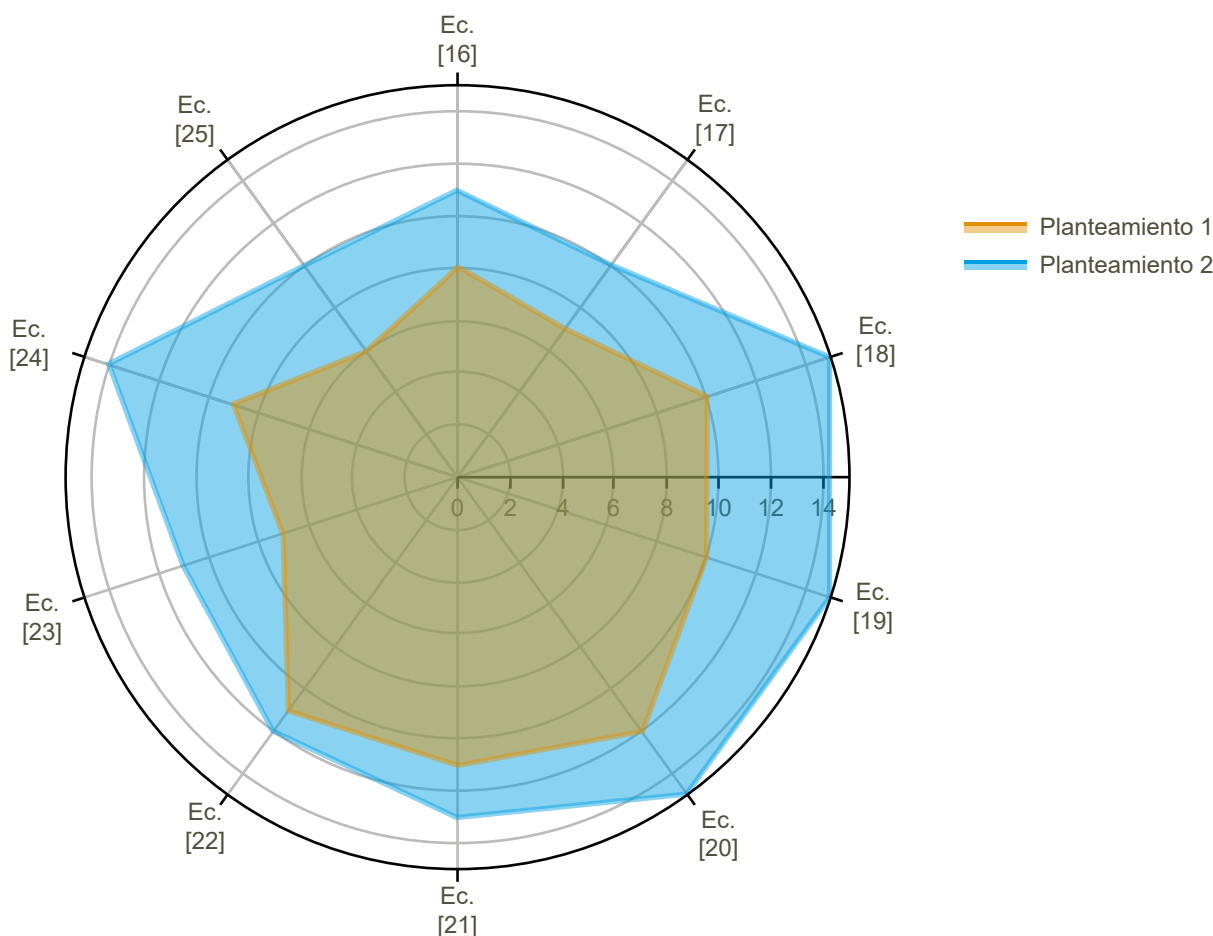


Figura 8. Diagrama de araña con el número de resultados representativos obtenidos por cada planteamiento y ecuación del método termométrico.

obtenido de la media del sumatorio del numerador y del denominador). Asimismo, la utilización de correlaciones experimentales para el término convectivo permitió obtener resultados más ajustados que el valor tabulado de la ISO 6946. En este sentido, las correlaciones de Alamdari y Hammond, de Churchill y Chu, y de Holman permitieron incrementar en 4 el número de casos representativos con respecto al valor tabulado. Finalmente, el filtrado de los datos con gradientes térmicos elevados también fue analizado en este trabajo. Los resultados permitieron comprobar como la utilización de filtrados de datos de 7°C hizo posible obtener un resultado más ajustado que en el caso de no filtrar los datos. Asimismo, aunque la utilización de un gradiente térmico superior a 7°C permitiría obtener resultados más ajustados, se

desaconseja su utilización tanto por el reducido número de datos que cumplirían dicha condición, como por las diferencias existentes con el filtrado de 7°C.

Se prevé que los resultados obtenidos con esta investigación serán de gran interés para arquitectos, ingenieros y auditores energéticos. Con la optimización del método se puede favorecer una alta tasa de caracterización del comportamiento termofísico de las fachadas del parque inmobiliario existente y que permita establecer medidas de ahorro energético eficientes. Todo ello contribuiría a reducir el consumo energético de los edificios y a reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmosfera favoreciendo el alcance de los objetivos de descarbonización establecidos por la Unión Europea.

REFERENCIAS

- (1) European Commission. (2011). *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*.
- (2) European Environment Agency. (2017). *Final energy consumption by sector and fuel (2017)*. Recuperado de <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>.
- (3) European Commission. (2006). *Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential*.
- (4) Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., y Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40, 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
- (5) United Nations Environment Programme. (2012). *Building Design and Construction: Forging Resource Efficiency and Sustainable Development*.
- (6) Aksoy, U. T., y Inalli, M. (2006). Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region. *Building and Environment*, 41, 1742–1754. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.011>.
- (7) De Lieto Vollaro, R., Guattari, C., Evangelisti, L., Battista, G., Carnielo, E. y Gori, P. (2015). Building energy performance analysis: A case study. *Energy and Buildings*, 87, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.080>.
- (8) Escorcía, O., García, R. Trebilcock, M., Celis, F. y Bruscatto, U. (2012). Envelope improvements for energy efficiency of homes in the south-central Chile. *Informes de La Construcción*. 64, 563–574. <https://doi.org/10.3989/ic.11.143>.
- (9) Friedman, C., Becker, N. y Erell, E. (2014). Energy retrofit of residential building envelopes in Israel: A cost-benefit analysis. *Energy*, 77, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.019>.
- (10) Gugliermetti, F. y Bisegna, F. (2007). Saving energy in residential buildings: The use of fully reversible windows. *Energy*, 32, 1235–1247. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.08.004>.
- (11) Pisello, A. L., Rossi, F. y Cotana, F. (2014). Summer and winter effect of innovative cool roof tiles on the dynamic thermal behavior of buildings. *Energies*, 7, 2343–2361. <https://doi.org/10.3390/en7042343>.
- (12) Adhikari, R., Lucchi, E. y Pracchi, V. (2012). Experimental measurements on thermal transmittance of the opaque vertical walls in the historical buildings. Trabajo presentado en PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, Lima, Perú.
- (13) Filippín, C. y Flores Larsen, S. (2005). Comportamiento térmico de invierno de una vivienda convencional en condiciones reales de uso. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 67–72.
- (14) Oral, G. K. y Yilmaz, Z. (2002). The limit U values for building envelope related to building form in temperate and cold climatic zones. *Building and Environment*, 37, 1173–1180. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00102-0).
- (15) Prada, A., Cappelletti, F., Baggio, P. y Gasparella, A. (2014). On the effect of material uncertainties in envelope heat transfer simulations. *Energy and Buildings*, 71, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.083>.
- (16) Bustamante, W., Bobadilla, A., Navarrete, B., Saelzer, G. y Vidal, S. (2005). Uso eficiente de la energía en edificios habitacionales. Mejoramiento térmico de muros de albañilería de ladrillos cerámicos. El caso de Chile. *Revista de la Construcción*, 4, 5–12.
- (17) Melo, A. P., Barcelos, M. M. y Folle, D. (2015). Análise térmica e energética da aplicação de isolante térmico em fachadas e cobertura de um edifício comercial. *Revista de Engenharia Civil IMED*, 2, 40–49. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v2n1p40-49>.
- (18) Bienvenido-Huertás, D., Rodríguez-Álvarez, R., Moyano, J. J., Rico, F. y Marín, D. (2018). Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations. *Energies*, 11, 1–17. <https://doi.org/10.3390/en11020360>.
- (19) Cesaratto, P. G., De Carli, M. y Marinetti, S. (2011). Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation. *Energy and Buildings*, 43, 1792–1801. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.021>.
- (20) Cucumo, M., Ferraro, V., Kaliakatsos, D. y Mele, M. (2018). On the distortion of thermal flux and of surface temperature induced by heat flux sensors positioned on the inner surface of buildings. *Energy and Buildings*, 158, 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.034>.
- (21) Cucumo, M., De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D. y Marinelli, V. (2006). A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance. *Energy and Buildings*, 38, 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.005>.
- (22) Desogus, G., Mura, S. y Ricciu, R. (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*, 43, 2613–2620. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.025>.

- (23) Meng, X., Yan, B., Gao, Y., Wang, J., Zhang, W. y Long, W. (2015). Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method. *Energy and Buildings*, 86, 754–765. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.005>.
- (24) Peng, C. y Wu, Z. (2008). In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction. *Energy and Buildings*, 40, 2076–2082. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.012>.
- (25) Trethowen, H. (1986). Measurement errors with surface-mounted heat flux sensors. *Building and Environment*, 21, 41–56. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(86\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(86)90007-7)
- (26) Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. A. y Gómez Melgar, S. (2017). A new metre for cheap, quick, reliable and simple thermal transmittance (U-Value) measurements in buildings. *Sensors*, 17, 1–18. <https://doi.org/10.3390/s17092017>
- (27) Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Rodríguez-Jiménez, C. E. y Marín, D. (2019). Applying an artificial neural network to assess thermal transmittance in walls by means of the thermometric method. *Applied Energy*, 233–234, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.052>
- (28) Kim, S. H., Kim, J. H., Jeong, H. G. y Song, K. D. (2018). Reliability Field Test of the Air–Surface Temperature Ratio Method for In Situ Measurement of U-Values. *Energies*, 11, 1–15. <https://doi.org/10.3390/en11040803>
- (29) Cesaratto, P. G. y de Carli, M. (2013). A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings. *Energy and Buildings*, 59, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.036>
- (30) International Organization for Standardization. (2007). *ISO 6946:2007 - Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*.
- (31) Wild, W. (2007). *Application of infrared thermography in civil engineering*.
- (32) Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J. J. y Marín, D. (2019). Influence of ICHTC correlations on the thermal characterization of façades using the quantitative internal infrared thermography method. *Building and Environment*, 149, 512–525. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.056>
- (33) Alamdari, F. y Hammond, G. P. (1983). Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. *Building Services Engineering Research and Technology*, 4, 106–112. <https://doi.org/10.1177/014362448300400304>
- (34) Churchill, S. W. y Chu, H. H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1049–1053.
- (35) Holman, J. P. (1986). *Heat Transfer (6th Edition)*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- (36) Fohanno, S. y Polidori, G. (2006). Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface. *Energy and Buildings*, 38, 548–553. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.09.003>
- (37) Earle, R. L. y Earle, W. D. (1983). *Unit Operations in Food Processing*.
- (38) Giesecke, F. E. (1940). Radiant heating and cooling. *ASHVE, J, Heating Piping Air Conditioning*, 12, 484–485.
- (39) Khalifa, A. J. N. y Marshall, R. H. (1990). Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33, 2219–2236. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(90\)90122-B](https://doi.org/10.1016/0017-9310(90)90122-B)
- (40) Wilkes, G. B. y Peterson, C. M. F. (1938). Radiation and convection from surfaces in various positions. *Transactions, ASHVE*, 44, 513–520.
- (41) International Organization for Standardization. (2014). *ISO 9869-1:2014 - Thermal insulation - Building elements - In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Part 1: Heat flow meter method*.
- (42) Tejedor, B., Casals, M., Gangoilells, M. y Roca, X. (2017). Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades. *Energy and Buildings*, 151, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.040>
- (43) Churchill, S. W. y Usagi, R. (1972). A general expression for the correlation of rates of transfer and other phenomena. *AIChE Journal*, 18, 1121–1128.
- (44) Evangelisti, L., Guattari, C., Gori, P., de Lieto Vollaro, R. y Asdrubali, F. (2016). Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.008>
- (45) Gobierno de España. (1979). *Real Decreto 2429/79, de 6 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, sobre Condiciones Térmicas en los Edificios*.
- (46) Gobierno de España. (2006). *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*.
- (47) Bienvenido-huertas, D., Moyano, J., Marín, D. y Fresco-contreras, R. (2019). Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.016>
- (48) Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. (2010). Catálogo de elementos constructivos del CTE. Recuperado de <https://www.codigotecnico.org/Programas/CatalogoElementosConstructivos.html>.
- (49) Pérez-Bella, J. M., Domínguez-Hernández, J., Cano-Suñén, E., Del Coz-Díaz, J. J. y Álvarez Rabanal, F. P. (2015). A correction factor to approximate the design thermal conductivity of building materials. Application to Spanish façades. *Energy and Buildings*, 88, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.005>