



Tesis Doctoral por Compendio de Publicaciones

Mención de Doctorado Internacional

OPTIMIZATION OF EXPERIMENTAL THERMAL CHARACTERIZATION METHODS
OF BUILDING ENVELOPE

OPTIMIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA
ENVOLVENTE DE EDIFICIOS

Doctorando: José David Bienvenido Huertas

Tutor: Dr. Jaime Solís Guzmán. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla.

Directores: Dr. Jaime Solís Guzmán. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla.

Dr. Juan José Moyano Campos. Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Universidad de Sevilla.

Dr. Carlos Eugenio Rodríguez Jiménez. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla.

Programa de Doctorado en Arquitectura (RD 99/2011)

Universidad de Sevilla

2019



Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación

Tesis elaborada en el seno del grupo de investigación de la Universidad de Sevilla PAIDI TEP970: Innovación Tecnológica, Sistemas de Modelado 3D y Diagnóstico Energético en Patrimonio y Edificación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.

Mención de Doctorado Internacional

- Dr. Jaime Solís Guzmán, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla.

- Dr. Juan José Moyano Campos, Profesor Titular del Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación de la Universidad de Sevilla.

- Dr. Carlos Eugenio Rodríguez Jiménez, Profesor Titular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla.

CERTIFICAN

1. Que la presente tesis doctoral está en cumplimiento con los requisitos marcados por el artículo 15 del Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado y del Acuerdo 7.2/CG 17-6-11 por el que se aprueba la Normativa de Estudios de Doctorado de la Universidad de Sevilla, para la obtención de la "Mención Internacional" en el título de Doctor.
2. Que, durante el período de formación necesario para la obtención del título de Doctor, el doctorando José David Bienvenido Huertas ha realizado una estancia de tres meses en el *Instituto Superior de Engenharia* de la *Universidade do Algarve* (Portugal), en el período comprendido entre el 30 de abril de 2019 y el 31 de julio de 2019.
3. Que tanto el resumen, los objetivos y las conclusiones se han redactado y serán presentados en lengua extranjera.
4. Que la tesis dispone de informe favorable de dos expertos doctores pertenecientes a instituciones de investigación extranjeras. En este sentido, la tesis dispone de informe favorable del Dr. Alexis Pérez Fargallo del Departamento de Ciencias de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (Chile) y del Dr. Jesús Alberto Pulido Arcas del *Graduate School of Arts and Sciences* de la Universidad de Tokio (Japón).
5. Que la tesis será defendida ante un experto de una institución no española.

Sevilla, a 11 de noviembre de 2019

Fdo. Dr. Jaime Solís
Guzmán

Fdo. Dr. Juan José
Moyano Campos

Fdo. Dr. Carlos Eugenio
Rodríguez Jiménez

Tesis por compendio de publicaciones

- Dr. Jaime Solís Guzmán, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla.

- Dr. Juan José Moyano Campos, Profesor Titular del Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación de la Universidad de Sevilla.

- Dr. Carlos Eugenio Rodríguez Jiménez, Profesor Titular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla.

CERTIFICAN

1. Que la organización y formato de esta tesis doctoral fue desarrollada conforme a los criterios establecidos para tesis por compendio de publicaciones publicados en el artículo 9 del Acuerdo 9.1/CG 19-4-12 por el que se aprueba la Normativa reguladora del régimen de la Tesis Doctoral de la Universidad de Sevilla.
2. Que el doctorando José David Bienvenido Huertas es el primer firmante en las 9 publicaciones incluidas en la tesis, siendo la principal figura en la realización de los ensayos, simulaciones, análisis de los datos y redacción de los artículos.
3. Que ninguna de las publicaciones compendiadas en la presente tesis doctoral ha sido ni será utilizada por terceros para la realización de otra tesis doctoral.
4. Que los indicadores de calidad de las revistas en las que han sido publicadas las investigaciones de esta tesis son los siguientes (basados en el índice de impacto *Journal Citation Report* de 2018, versión más reciente en la fecha de depósito de la presente tesis):
 - Revista: Renewable and Sustainable Energy Reviews.
Factor de impacto: 10,556.
Cuartil: Q1 (Green & Sustainable Science & Technology).
Posición: 1 de 35.
 - Revista: Applied Energy.
Factor de impacto: 8,426.
Cuartil: Q1 (Energy & Fuels).
Posición: 8 de 103.
 - Revista: Building and Environment.
Factor de impacto: 4,820.
Cuartil: Q1 (Construction & Building Technology).
Posición: 4 de 63.
 - Revista: Energy and Buildings.
Factor de impacto: 4,495.
Cuartil: Q1 (Construction & Building Technology).
Posición: 7 de 63.

- Revista: Building Research and Information.
Factor de impacto: 3,744.
Cuartil: Q1 (Construction & Building Technology).
Posición: 12 de 63.
- Revista: Sustainability.
Factor de impacto: 2,592.
Cuartil: Q2 (Environmental sciences).
Posición: 105 de 250.
- Revista: Energies.
Factor de impacto: 2,707.
Cuartil: Q3 (Energy & Fuels).
Posición: 56 de 103.

Sevilla, a 11 de noviembre de 2019

Fdo. Dr. Jaime Solís
Guzmán

Fdo. Dr. Juan José
Moyano Campos

Fdo. Dr. Carlos Eugenio
Rodríguez Jiménez

Publicaciones asociadas a la tesis doctoral

La presente tesis doctoral está sustentada por un total de 9 artículos científicos publicados en revistas científicas de alto impacto, los cuales son:

- Bienvenido-Huertas, D., Rodríguez-Álvaro, R., Moyano, J., Rico, F., & Marín, D. (2018). Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations, *Energies*. 11(2), 1–17. doi:10.3390/en11020360.
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Rodríguez-Jiménez, C. E., & 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. doi:10.1016/j.apenergy.2018.10.052.
- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J., & Marín, D. (2019). Comparison of quantitative IRT to estimate U-value using different approximations of ECHTC in multi-leaf walls, *Energy and Buildings*. 184, 99–113. doi:10.1016/j.enbuild.2018.11.028.
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Marín, D., & Fresco-Contreras, R. (2019). Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 102, 356–371. doi:10.1016/j.rser.2018.12.016.
- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J., & 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. doi:10.1016/j.buildenv.2018.12.056.
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Sánchez-García, & D., Moyano, J. (2019). Internal surface condensation risk in façades of Spanish social dwellings. *Building Research and Information*. 47, 1–20, doi:10.1080/09613218.2019.1612729.
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordóñez, J. L., & Moyano, J. (2019). Optimizing the evaluation of thermal transmittance with the thermometric method using multilayer perceptrons, *Energy and Buildings*. 198, 395–411. doi:10.1016/j.enbuild.2019.06.040.
- Bienvenido-Huertas, D., Oliveira, M., Rubio-Bellido, C., & Marín, D. (2019). A comparative analysis of the international regulation of thermal properties in building envelope, *Sustainability*, 11, 5574. doi:10.3390/su11205574
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordóñez, J. L., & Oliveira, M. (2020). Automation and optimization of in-situ assessment of wall thermal transmittance using a Random Forest algorithm, *Building and Environment*. 168. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106479.

Agradecimientos

A mis directores de tesis, Jaime Solís Guzmán, Juan José Moyano Campos y Carlos Eugenio Rodríguez Jiménez, por su entrega y dedicación durante todo el proceso de realización de la tesis y por su arduo intento de encontrar financiación hasta en los rincones más imposibles.

A Rocío, mi compañera de vida, por ser el bastón que me ayuda a conseguir que este camino que es la vida cobre sentido y por ser la autora “fantasma” tanto de esta tesis como de todos mis trabajos.

A mi madre, por su tenacidad en apoyarme en todo momento y por ser un ejemplo de superación ante las adversidades.

A mi abuelo, por enseñarme que con esfuerzo y constancia todo se puede conseguir.

A mi tío, por ser fuente de inspiración académica y por demostrar que no existen fronteras en el mundo universitario entre titulaciones.

A Luna, la F. D. C. Willard de esta tesis.

A Daniel Sánchez García, por ser mi instructor en mis primeras etapas sobre lo que consiste la vida de un investigador.

A Roberto Rodríguez Álvaro, por abrir el sendero de la transmitancia térmica.

A Juan Luis Pérez Ordóñez, por su apoyo constante durante todas las investigaciones realizadas y por su amabilidad en mis visitas al norte.

A Javier Bermúdez Rodríguez, por sus lecciones de física que tanto han ayudado al desarrollo de la tesis.

A David Marín García, por su constante predisposición a recibirme y ayudarme en todo lo posible.

A Carlos Rubio Bellido, por sus orientaciones y sabios consejos durante la realización de la tesis.

A Miguel Santos de Oliveira, por facilitarme la realización de la estancia internacional en la Universidade do Algarve.

A Daniel Rüdisser, por facilitarme la utilización del software HTFlux para los trabajos de simulación.

A Fernando Rico Delgado, por aceptar en sus inicios la codirección de la tesis.

A Alexis Pérez Fargallo y a Jesús Alberto Pulido Arcas, por evaluar esta tesis en su fase final.

A la Agencia de Vivienda y Rehabilitación en Andalucía, por facilitarme documentación relativa a sus campañas experimentales.

A los departamentos de Expresión Gráfica e Ingeniería de la Edificación y de Construcciones Arquitectónicas II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de

Edificación, por facilitarme la utilización del instrumental y del equipo técnico para la realización de las campañas experimentales.

Al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla por el "Premio Trimestral IUACC a la Mejor Publicación Científica en Arquitectura y Ciencias de la Construcción Noviembre 2018" a la publicación titulada "Applying an artificial neural network to assess thermal transmittance in walls by means of the thermometric method".

A todas aquellas familias que me permitieron realizar ensayos experimentales en sus casas.

A mis amigos, por su cariño y apoyo desde la distancia.

A todos ellos, gracias de corazón.

Tesis Doctoral por Compendio de Publicaciones

Mención de Doctorado Internacional

OPTIMIZATION OF EXPERIMENTAL THERMAL CHARACTERIZATION METHODS
OF BUILDING ENVELOPE

OPTIMIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA
ENVOLVENTE DE EDIFICIOS

Doctorando: José David Bienvenido Huertas

Tutor: Dr. Jaime Solís Guzmán. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla.

Directores: Dr. Jaime Solís Guzmán. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla.

Dr. Juan José Moyano Campos. Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Universidad de Sevilla.

Dr. Carlos Eugenio Rodríguez Jiménez. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla.

Programa de Doctorado en Arquitectura (RD 99/2011)

Universidad de Sevilla

2019

Resumen

En los últimos años, la creciente preocupación por el elevado consumo energético de los edificios se ha focalizado a través de la rehabilitación energética con el objetivo de reducirlo. En este sentido, la transmitancia térmica de los cerramientos determina en gran medida este consumo energético, por lo que existe un gran interés por disponer de métodos que permitan evaluarla de manera precisa. Esta propiedad se puede determinar a través de diferentes procedimientos tanto teóricos como experimentales. Todos estos métodos pueden verse afectados por una serie de factores que pueden derivar en la obtención de resultados atípicos. Aspectos tales como el uso de variables tabuladas, los errores metrológicos, la inercia térmica o los factores ambientales pueden influir de manera significativa en los resultados.

Ante esta circunstancia, en esta tesis se realizaron una serie de estudios para abordar las principales debilidades detectadas en la literatura científica: el análisis del término convectivo utilizado en los métodos de termografía infrarroja cuantitativa, el análisis y la optimización del método termométrico y, por último, la estimación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 a través de mediciones *in situ*. Para obtener una gran cantidad de datos, se llevaron a cabo dos campañas experimentales cuyos diseños se adaptaron a las necesidades particulares de cada planteamiento. Asimismo, la combinación de los datos experimentales con otras técnicas, como procesos de simulación y la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, permitió desarrollar diferentes investigaciones.

La utilización de las correlaciones experimentales de números adimensionales para el método interior de termografía infrarroja cuantitativa resultó ser la aplicación más adecuada para este método. En esta línea, el análisis de los datos obtenidos para este aspecto mostró que el número de resultados válidos conseguidos fue superior al de otras correlaciones experimentales desde el interior y desde el exterior. Además, la realización de los ensayos en el interior permite garantizar la disminución de la influencia de las condiciones ambientales.

Con respecto al método termométrico, los resultados obtenidos en la tesis mostraron las posibilidades de aplicación del método en cerramientos, siempre que se reúnan las condiciones aceptables en dos aspectos operacionales (un gradiente térmico elevado y equipos apropiados), así como un filtrado de datos adecuados. Las limitaciones relacionadas con la carencia de otros procedimientos de cálculos para correcciones por almacenamiento de calor y las posibles desviaciones por el empleo de valores teóricos para el coeficiente de transferencia de calor total interior se resolvieron utilizando perceptrones multicapa.

Finalmente, el uso de bosques aleatorios y de perceptrones multicapa permitió conseguir estimaciones ajustadas de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 a través de variables medidas experimentalmente, siendo el primero de ellos el que obtuvo un mejor grado de ajuste.

Palabras clave: *transmitancia térmica, fachada, método termoflujométrico, método termométrico, termografía infrarroja cuantitativa, método teórico, inteligencia artificial, perceptrón multicapa, bosques aleatorios, clima mediterráneo.*

Abstract¹

In recent years, increasing concerns about the high building energy consumption have been focused on the energy rehabilitation to reduce this consumption. In this regard, the thermal transmittance of walls determines this energy consumption to a great extent, so there is a considerable interest in using methods assessing it accurately. Such property could be determined by various procedures, both theoretical and experimental, and all these methods are subject to a series of factors that could result in obtaining atypical values. Aspects such as the use of tabulated variables, metrological errors, thermal inertia or environmental factors could strongly affect the results.

Based on these reasons, this thesis conducted a series of research studies to tackle the main weaknesses found in the scientific literature: the analysis of the convective term used in quantitative infrared thermography methods, the analysis and optimization of the thermometric method, and the estimation of thermal transmittance from ISO 6946 with in situ measurements. To obtain many experimental data, two experimental campaigns were performed. The design of such campaigns was adapted to the needs of each approach. Also, various research studies were developed by combining experimental data using other techniques, such as simulation processes and the application of automatic learning algorithms.

The results showed that the use of experimental correlations of adimensional numbers for the quantitative internal infrared thermography method constitutes the most appropriate possibility for this method. The analysis of the data obtained for this aspect reflected that the number of valid results obtained with this configuration was higher than that of other experimental correlations from the interior and exterior. Likewise, performing tests from the interior ensures the decrease of the influence of environmental conditions.

As for the thermometric method, the results obtained in this thesis showed the possibilities of using the method in walls if acceptable conditions are met in two operational aspects (a high thermal gradient and appropriate equipment), as well as an appropriate data filter. The limitations related to the lack of other calculation procedures for heat storage corrections and the possible variations due to the use of theoretical values for the total internal heat transfer coefficient were solved by using multilayer perceptrons.

Finally, by using random forests and multilayer perceptrons, acceptable estimations of the thermal transmittance from ISO 6946 were achieved through variables experimentally measured, and random forests were those obtaining the best adjustment degree.

Keywords: *thermal transmittance, façade, heat flow meter method, thermometric method, quantitative infrared thermography, theoretical method, artificial intelligence, multilayer perceptron, random forests, Mediterranean climate.*

¹ En cumplimiento con los criterios necesarios para la mención de Doctorado Internacional, se redacta el resumen en lengua inglesa.

Riassunto²

Negli ultimi anni, la crescente preoccupazione per l'elevato consumo energetico degli edifici si è concentrata sulla riqualificazione energetica con l'obiettivo di ridurre tale consumo. In questo senso, la trasmittanza termica dell'involucro determina in larga misura questo consumo di energia, quindi c'è un grande interesse ad avere metodi che consentano di valutarlo in modo preciso. Questa proprietà può essere determinata attraverso diverse procedure, sia teoriche che sperimentali. Tutti questi metodi sono soggetti a una serie di fattori che possono portare a valori anomali. Aspetti quali l'uso di variabili tabulate, errori metrologici, inerzia termica o fattori ambientali possono influenzare significativamente i risultati.

Di fronte a tale circostanza, in questa tesi sono stati realizzati una serie di studi allo scopo di affrontare le principali carenze individuate nella letteratura scientifica: l'analisi del termine convettivo utilizzato nei metodi di termografia quantitativa a infrarossi, l'analisi e l'ottimizzazione del metodo termometrico, e la stima della trasmittanza termica della norma ISO 6946 mediante misurazioni in loco. Sono state condotte due campagne sperimentali per ottenere una grande quantità di dati sperimentali. La progettazione di queste campagne è stata adattata alle particolari esigenze di ciascun approccio. Inoltre, la combinazione di dati sperimentali con altre tecniche, come i processi di simulazione e l'applicazione di algoritmi di apprendimento automatico, ha permesso di sviluppare le diverse indagini.

I risultati riflettono come l'uso delle correlazioni sperimentali di numeri adimensionali per il metodo interno di termografia quantitativa a infrarossi sia la possibilità di applicazione più adatta per questo metodo. In questo senso, l'analisi dei dati ottenuti per questo aspetto riflette come il numero di risultati validi ottenuti con questa configurazione fosse superiore a quello di altre correlazioni sperimentali dall'interno e dall'esterno. Inoltre, l'esecuzione delle prove dall'interno garantisce una riduzione dell'influenza delle condizioni ambientali.

Per quanto riguarda il metodo termometrico, i risultati ottenuti nella tesi hanno dimostrato la possibilità di utilizzare il metodo negli involucri, purché siano soddisfatte condizioni adeguate in due aspetti operativi (elevata pendenza termica e apparecchiature appropriate) e un adeguato filtraggio dei dati. Le limitazioni relative alla mancanza di altre procedure di calcolo per le correzioni dell'accumulo di calore e le possibili deviazioni dall'uso di valori teorici per il coefficiente di trasferimento termico totale interno sono state risolte con l'uso di percertroni multistrato.

Infine, l'uso di foreste casuali e percertroni multistrato ha permesso di ottenere stime adeguate della trasmittanza termica della ISO 6946 attraverso variabili misurate sperimentalmente, essendo la prima ad ottenere un migliore grado di regolazione.

Parole chiave: trasmittanza termica, facciata, metodo termoflussimetrica, metodo termometrico, termografia quantitativa a infrarossi, metodo teorico, intelligenza artificiale, percertroni multistrato, foreste casuali, clima mediterraneo.

² En cumplimiento con los criterios necesarios para la mención de Doctorado Internacional, se redacta el resumen en lengua italiana.



Índice

1. Introducción.....	29
2. Justificación de la problemática energética de los edificios	33
2.1. Degradación ambiental y cambio climático	33
2.2. El sector de la edificación y su desempeño energético	34
3. Contexto actual de la transmitancia térmica	37
3.1. El marco regulatorio a nivel internacional de las propiedades térmicas de la envolvente y su influencia en el desempeño energético	37
3.1.1. Francia	38
3.1.2. Portugal.....	40
3.1.3. España.....	41
3.1.4. Chile.....	43
3.1.5. Argentina.....	44
3.1.6. Brasil.....	46
3.1.7. Grado de importancia de la transmitancia térmica en la demanda energética de los edificios	48
3.2. La influencia de las propiedades térmicas de la envolvente en las condiciones de salubridad en el interior de las viviendas.....	51
3.3. La relevancia de la transmitancia térmica	55
4. Estado del arte	57
4.1. Métodos de caracterización de la transmitancia térmica	57
4.2. Método teórico-estimativo	58
4.3. Método termoflujométrico (HFM).....	62
4.3.1. HFM: Requisitos metrológicos y condiciones de ensayo	64
4.3.2. HFM: Análisis de datos.....	67
4.4. Método termométrico (THM)	71
4.5. Método de termografía infrarroja cuantitativa (QIRT)	73
4.5.1. QIRT: Requisitos metrológicos y condiciones de ensayo.....	77
4.5.2. QIRT: Análisis de datos.....	78
4.6. Análisis crítico del estado de la cuestión	79
5. Objetivos	83
5. <i>Objectives</i>	84
5. <i>Obiettivi</i>	85
6. Metodología	87

6.1. Proceso 1. Campañas experimentales	88
6.1.1. Subproceso 1.1.: Selección previa de los casos de estudio	88
6.1.2. Subproceso 1.2.: Campañas experimentales realizadas	90
6.2. Proceso 2. Simulaciones	95
6.3. Proceso 3. Análisis de datos	98
6.3.1. Subproceso 3.1.: Análisis de los resultados de las campañas experimentales y de las correlaciones experimentales del término convectivo utilizadas	98
6.3.2. Subproceso 3.2.: Análisis mediante aprendizaje automático	104
6.3.3. Subproceso 3.3.: Análisis clúster	113
7. Resultados y discusión	115
7.1. Optimización del término convectivo en los métodos cuantitativos de termografía infrarroja	116
7.2. Análisis y optimización del método termométrico	121
7.2.1. Análisis de aplicación del método termométrico en casos de estudio	122
7.2.2. Aplicación del procedimiento de corrección de almacenamiento de calor en el método termométrico	123
7.2.3. Optimización de la evaluación de la transmitancia térmica con el método termométrico	125
7.3. Determinación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 con variables <i>in situ</i>	129
8. Conclusiones	133
8. <i>Conclusions</i>	137
8. <i>Conclusioni</i>	141
9. Futuras líneas	145
10. Bibliografía	147
Anexo I. Publicaciones	165

Índice de figuras

Figura 1. Consumo energético final en Europa por sectores	35
Figura 2. Consumo energético final en España por sectores en el año 2016	35
Figura 3. Clasificación climática en Francia	40
Figura 4. Clasificación climática en Portugal: (a) invierno y (b) verano	41
Figura 5. Clasificación climática en España: (a) invierno y (b) verano	42
Figura 6. Clasificación climática en Chile	44
Figura 7. Clasificación climática en Argentina	45
Figura 8. Clasificación climática en Brasil	47
Figura 9. Modelos de edificios diseñados para el análisis comparativo	48
Figura 10. Disminución porcentual en la demanda energética total en los diferentes casos de estudio analizados utilizando los valores límites nuevos para el año 2023 en Francia	49
Figura 11. Tendencia lineal de la demanda energética total media de los 12 modelos analizados en las diferentes zonas climáticas y conforme a las limitaciones de cada legislación estatal	50
Figura 12. Caso de estudio del análisis de condensaciones: (a) fotografía del edificio; (b) boceto de la habitación analizada; (c) sección y puntos de la fachada analizados; (d) efecto de la bidimensionalidad de la fachada en sus isotermas; y (e) muestra de algunos de los termogramas realizados.....	52
Figura 13. Gráficos de dispersión entre la temperatura superficial interior en los diferentes puntos de la fachada y las temperaturas ambientales	53
Figura 14. Esquema de los diferentes métodos de determinación de la transmitancia térmica	57
Figura 15. Mapa con los coeficientes de ponderación CCF para el cálculo teórico	61
Figura 16. Criterios de colocación de las sondas de medición en el HFM	64
Figura 17. Boceto de la diferencia existente entre los métodos termoflujométrico y termométrico	71
Figura 18. Influencia de las juntas de mortero en el THM: (a) termograma de la superficie interior de una fachada donde se pueden apreciar las juntas de mortero y (b) criterios de colocación de las sondas de temperatura superficial.....	72
Figura 19. Ejemplos de termogramas para diferentes tipos de análisis cualitativo realizados en fachadas: (a) anomalías térmicas; (b) puentes térmicos de frente de forjado y pilares en fachadas; y (c) infiltraciones de aire a través de las carpinterías	73
Figura 20. Criterios de colocación de los equipos y de las sondas del QIRT. La utilización de cada sonda o material dependerá del método elegido. En la figura no se distingue entre exterior e interior	77

Figura 21. Correlaciones entre los valores de flujo de radiación obtenidos según la ecuación utilizada por Madding (2008), por Fokaides y Kalogirou (2011) y por Tejedor et al. (2017).....	80
Figura 22. Representación esquemática del flujo de los procesos de trabajo	87
Figura 23. Fotografía de alguno de los edificios analizados	90
Figura 24. Ejemplos de colocación de los equipos y las sondas I: (a) aplicación de la pasta térmica; (b) colocación de la placa medidora de flujo de calor; y (c) fijación del termopar superficial mediante masilla	92
Figura 25. Ejemplos de colocación de los equipos y las sondas II: (a) alineación de las sondas de temperatura superficial; (b) colocación de la sonda de temperatura exterior; y (c) colocación del gestor de datos TESTO 435-2	92
Figura 26. Ejemplos de las monitorizaciones exterior e interior realizadas durante la campaña 2	94
Figura 27. Flujo de trabajo del proceso de simulación realizado en la investigación	96
Figura 28. Nubes de puntos con el ajuste entre los valores simulados y los reales de las variables de temperatura superficial y de flujo de calor	97
Figura 29. Ejemplo de varias series de tiempo simuladas. En los gráficos se representa la temperatura del aire interior (en color rojo), la temperatura del aire exterior (en color azul), la temperatura superficial interior (en color lila) y el flujo de calor (en color verde)	97
Figura 30. Esquemas de neuronas: (a) neurona biológica y (b) neurona artificial	105
Figura 31. Esquema de un perceptrón multicapa de diferentes capas ocultas	106
Figura 32. Esquema de un modelo CART	109
Figura 33. Esquema de un modelo de bosques aleatorios	110
Figura 34. Esquema de la validación cruzada de 10 iteraciones en un conjunto de datos de entrenamiento	112
Figura 35. Desviaciones porcentuales obtenidas en los métodos desde el exterior que utilizan correlaciones de velocidades del viento. En los gráficos de la derecha se representa el número de resultados válidos obtenidos en cada caso de estudio	118
Figura 36. Desviaciones porcentuales obtenidas en los métodos desde el exterior que utilizan correlaciones de números adimensionales. En los gráficos de la derecha se representa el número de resultados válidos obtenidos en cada caso de estudio	119
Figura 37. Desviaciones porcentuales obtenidas en los métodos desde el interior para los dos tipos de correlaciones (diferencias de temperatura y números adimensionales)	120
Figura 38. Flujo de trabajo de las investigaciones realizadas en relación con el análisis y la optimización del método termométrico	122
Figura 39. Desviación porcentual entre los valores de referencia y los valores medidos por el método termométrico con los dos equipos utilizados	123
Figura 40. Histograma con la desviación porcentual entre los valores reales y los estimados de los dos perceptrones multicapa diseñados en el estudio (el ancho de columna es de un valor de un 1 %).....	125

Figura 41. Histograma con la desviación porcentual entre los valores reales y los estimados de los diferentes perceptrones multicapa diseñados en el estudio para la estimación del método promedio y del método promedio con correcciones por almacenamiento de calor (el ancho de columna es de un valor de un 1 %)...... 127

Figura 42. Desviación porcentual entre los valores reales y los estimados por los diferentes perceptrones multicapa diseñados en el estudio de los cerramientos utilizados para su análisis individual..... 128

Figura 43. Flujo de aplicación de los modelos de aprendizaje automático desarrollados..... 131



Índice de tablas

Tabla 1. Valores mínimos de resistencia térmica de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación francesa)	39
Tabla 2. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos acristalados de edificios (regulación francesa).....	39
Tabla 3. Valores mínimos de resistencia térmica de los elementos opacos de la envolvente de edificios a partir del 1 de enero de 2023 (regulación francesa).....	39
Tabla 4. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos opacos y acristalados de la envolvente de edificios (regulación portuguesa)	41
Tabla 5. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos opacos y acristalados de la envolvente de edificios (regulación española).....	43
Tabla 6. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos opacos y acristalados de la envolvente de edificios (regulación chilena).....	43
Tabla 7. Valores máximos de transmitancia térmica de verano de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación argentina)	45
Tabla 8. Valores máximos de transmitancia térmica de invierno de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación argentina)	46
Tabla 9. Valores máximos de transmitancia térmica de verano de los elementos acristalados de la envolvente de edificios (regulación argentina)	46
Tabla 10. Valores máximos de transmitancia térmica de invierno de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación brasileña)	47
Tabla 11. Horas por año con riesgo de crecimiento de moho en el escenario actual	54
Tabla 12. Porcentaje de desviación del número de horas anuales con riesgo de crecimiento de moho en el escenario 2050. Los valores negativos corresponden a una disminución porcentual y los valores positivos, a un incremento porcentual.....	54
Tabla 13. Horas por año con riesgo de crecimiento de moho en el supuesto de incorporar un sistema de ventilación (escenario actual y 2050).....	55
Tabla 14. Resumen de los trabajos de investigación del método teórico-estimativo.....	59
Tabla 15. Resumen de los trabajos de investigación del HFM.....	63
Tabla 16. Resumen de los trabajos de investigación del QIRT.....	74
Tabla 17. Beneficios y limitaciones de los diferentes métodos de caracterización de la transmitancia térmica en fachadas	79
Tabla 18. Subprocesos (SP) asociados a cada investigación.....	88
Tabla 19. Número de ensayos correspondientes a cada investigación.....	91
Tabla 20. Relación de equipos utilizados en la campaña 1	91
Tabla 21. Propiedades termofísicas de los cerramientos de la campaña 2.....	93
Tabla 22. Relación de los equipos específicos utilizados en la campaña 2	94
Tabla 23. Resumen de las expresiones utilizadas para los diferentes planteamientos de caracterización de la transmitancia térmica.....	98
Tabla 24. Contribuciones de incertidumbre estimadas para los resultados obtenidos a	

través de los métodos experimentales	99
Tabla 25. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo debido a correlaciones con la velocidad del viento.....	101
Tabla 26. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo debido a correlaciones con números adimensionales	102
Tabla 27. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo interno debido a correlaciones con diferencias de temperaturas.....	103
Tabla 28. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo interno debido a correlaciones con números adimensionales	104
Tabla 29. Publicaciones asociadas a las investigaciones de optimización de los métodos experimentales de transmitancia térmica	115
Tabla 30. Agrupaciones de las correlaciones experimentales del término convectivo obtenidas con el análisis clúster.....	117

Siglas, abreviaturas y símbolos

Siglas y abreviaturas

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ARX	Auto regresión con variables exógenas (en inglés, <i>autoregressive models with exogenous variables</i>)
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (en inglés, <i>American Society for Testing and Materials</i>)
AVRA	Agencia de Vivienda y Rehabilitación de Andalucía
CART	Árbol de clasificación y regresión (en inglés, <i>classification and regression tree</i>)
DB HE	Documento Básico de Ahorro de Energía
FP	Falsos positivos (en inglés, <i>false positive ratio</i>)
HFM	Método termoflujométrico (en inglés, <i>heat flow meter method</i>)
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
ISO	Organización Internacional de Normalización (en inglés, <i>International Organization for Standardization</i>)
MAE	Error promedio absoluto (en inglés, <i>mean absolute error</i>)
MLP	Perceptrón multicapa (en inglés, <i>multilayer perceptron</i>)
NCh	Normas chilenas
QIRT	Método cuantitativo mediante termografía infrarroja (en inglés, <i>quantitative infrared thermography method</i>)
RF	Bosques aleatorios (en inglés, <i>random forest</i>)
RMSE	Error de la raíz cuadrada de la media (en inglés, <i>root mean square error</i>)
ROC	Característica Operativa del Receptor (en inglés, <i>receiver operating characteristic</i>)
SP	Subproceso
THM	Método termométrico (en inglés, <i>thermometric method</i>)
TP	Verdaderos positivos (en inglés, <i>true positive ratio</i>)

Símbolos

A_l	Coefficiente de regresión del método de Anderlind [adimensional]
B_l	Coefficiente de regresión del método de Anderlind [adimensional]
C	Capacidad térmica del cerramiento [J/(m ² ·K)]
C_k	Capacidad térmica de la capa k [J/(m ² ·K)]
CCF	Factor de corrección de la conductividad térmica [adimensional]
F_{ext}	Factor de masa térmica total exterior [J/(m ² ·K)]
$F_{Hcorreccion}$	Factor de corrección de humedad [adimensional]
F_{in}	Factor de masa térmica total interior [J/(m ² ·K)]
$F_{Tcorreccion}$	Factor de corrección de temperatura [adimensional]
h_{ext}	Coefficiente convectivo externo [W/(m ² ·K)]
h_{in}	Coefficiente convectivo interno [W/(m ² ·K)]
k	Conductividad térmica del aire [W/(m·K)]
L	Altura del cerramiento [m]
Pr	Número de Prandtl [adimensional]
Ra_L	Número de Rayleigh [adimensional]
R	Resistencia térmica del cerramiento [(m ² ·K)/W]
R'	Coefficiente de regresión del método de Anderlind [adimensional]
R_1	Resistencia térmica por unidad de área entre el aire interno y la masa térmicas [(m ² ·K)/W]
R_2	Resistencia térmica por unidad de área entre el aire externo y la masa térmicas [(m ² ·K)/W]
$R_{ext,k}$	Sumatorio de las resistencias térmicas exteriores desde la capa $k+1$ hasta el aire exterior [(m ² ·K)/W]
$R_{in,k}$	Sumatorio de las resistencias térmicas interiores desde la capa $k-1$ hasta el aire interior [(m ² ·K)/W]
R_k	Resistencia térmica de la capa k [(m ² ·K)/W]
$R_{s,ext}$	Resistencia térmica superficial exterior [(m ² ·K)/W]
$R_{s,in}$	Resistencia térmica superficial interior [(m ² ·K)/W]
s_i	Espesor de cada una de las capas del cerramiento [m]
T_{ext}	Temperatura del aire exterior [K]
T_{in}	Temperatura del aire interior [K]

T_{masa}	Temperatura de la masa térmica [K]
T_{refl}	Temperatura aparente reflejada [K]
$T_{s,ext}$	Temperatura superficial exterior del cerramiento [K]
$T_{s,in}$	Temperatura superficial interior del cerramiento [K]
U	Transmitancia térmica [$W/(m^2 \cdot K)$]
U_{6946}	Transmitancia térmica obtenida por el método de la ISO 6946:2007 [$W/(m^2 \cdot K)$]
U_{9869-1}	Transmitancia térmica obtenida por el método de la ISO 9869-1:2014 [$W/(m^2 \cdot K)$]
$U_{i,max}$	Valor máximo de transmitancia térmica [$W/(m^2 \cdot K)$]
$U_{i,min}$	Valor mínimo de transmitancia térmica [$W/(m^2 \cdot K)$]
v	Velocidad del viento local [m/s]

Símbolos griegos

δT_{ext}	Diferencia entre la temperatura de aire exterior media de las 24 horas anteriores a la medición y la temperatura del aire exterior media de las primeras 24 horas del ensayo [K]
δT_{in}	Diferencia entre la temperatura de aire interior media de las 24 horas anteriores a la medición y la temperatura del aire interior media de las primeras 24 horas del ensayo [K]
ε	Emisividad [adimensional]
λ_{CCF}	Conductividad térmica corregida usando CCF [$W/(m \cdot K)$]
λ_{eq}	Conductividad térmica equivalente del cerramiento [$W/(m \cdot K)$]
λ_i	Conductividad térmica de cada una de las capas del cerramiento [$W/(m \cdot K)$]
$\lambda_{i,max}$	Valor máximo de conductividad térmica [$W/(m \cdot K)$]
$\lambda_{i,min}$	Valor mínimo de conductividad térmica [$W/(m \cdot K)$]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$]
τ	Intervalo temporal entre instancias del conjunto de datos [s]
Δt	Intervalo de tiempo entre medidas [s]

1. Introducción

A raíz de la crisis del petróleo de los años 70, la preocupación por los efectos del cambio climático sobre el planeta se vio incrementada exponencialmente. En la actualidad, el calentamiento global y el agotamiento de los recursos no renovables constituyen las principales preocupaciones de la sociedad. Ante esta problemática, se ha visto reflejada una mayor exigencia en el desempeño energético de numerosos sectores, entre los que se incluye la edificación a causa del comportamiento energético poco eficiente que presenta la mayor parte del parque inmobiliario existente (Horne & Hayles, 2008; Kurtz, Monzón, & López-Mesa, 2015). En datos cuantificados, el sector de la edificación es responsable de aproximadamente un 30 % del consumo de energía a nivel global (The United Nations Environment Programme, 2012) y genera el 40 % de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera (European Commission, 2002; European Union, 2010).

Por consiguiente, la Unión Europea ha definido los pasos necesarios para alcanzar una economía baja en carbono para el año 2050 (Rodríguez-Soria, Domínguez-Hernández, Pérez-Bella, & Del Coz-Díaz, 2015). Para ello, es necesario que el sector de la edificación, entre otras cuestiones, reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero un 90 % (European Commission, 2011). Recientemente, la Directiva 2018/844 (European Union, 2018) ha establecido la necesidad por parte de los países europeos de desarrollar estrategias de renovación energética del parque inmobiliario existente para disponer de edificios eficientes antes del 2050. La mayor parte del consumo de los edificios se debe a la utilización de los sistemas de climatización, de manera que la reducción de la demanda energética para garantizar unas condiciones de confort térmico interior adecuadas se encuentra entre las principales necesidades de los edificios con un deficiente rendimiento energético.

Así pues, la adopción de medidas de ahorro energético constituye una de las actuaciones más significativas. De los distintos elementos que componen los edificios, los elementos de la envolvente contribuyen en gran proporción al desempeño energético ineficiente del parque inmobiliario existente a raíz de las pérdidas o las ganancias de calor que tienen lugar a través de ellos (De Lieto Vollaro et al., 2015; Escorcía, García, Trebilcock, Celis, & Bruscato, 2012). Las fachadas, a su vez, son los elementos de la envolvente con un mayor impacto en el desempeño energético, puesto que son el elemento de mayor superficie que se encuentra en contacto con el exterior (Walker & Pavía, 2015).

Asimismo, de las diferentes variables que caracterizan el rendimiento térmico de la fachada, la transmitancia térmica es la más influyente (Natephra, Yabuki, & Fukuda, 2018; Oral & Yilmaz, 2002), ya que el comportamiento térmico de las fachadas del parque inmobiliario existente es deficiente debido tanto a su diseño como al envejecimiento de los materiales (Waddicor et al., 2016). Determinar correctamente la transmitancia térmica resulta fundamental para no sobreestimar el consumo energético (Rhee-Duverne & Baker, 2013), para seleccionar las medidas de ahorro energético necesarias y para reducir los períodos de retorno de la inversión económica (Luxán García de Diego, Gómez Muñoz, & Román López, 2015).

La transmitancia térmica se puede determinar a través de varios procedimientos: mediante una estimación teórica de su valor o mediante ensayos *in situ*. El método de la norma ISO 6946:2007 es el procedimiento teórico-estimativo para calcular la transmitancia térmica de un cerramiento convencional a través de las resistencias térmicas superficiales, así como del espesor y de la conductividad térmica de cada una de sus capas. Se trata de un método ampliamente utilizado en la literatura científica y recogido en las reglamentaciones de cada país. Sin embargo, presenta un nivel de incertidumbre elevado debido a que, en la mayoría de los casos, se desconoce la composición del cerramiento y los valores de conductividad térmica

de cada una de sus capas de los cerramientos de los edificios existentes (Ficco, Iannetta, Ianniello, D'Ambrosio Alfano, & Dell'Isola, 2015).

Respecto a los métodos experimentales, el método termoflujométrico es el único que se encuentra estandarizado a través de la norma ISO 9869-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014). El método consiste en la obtención del valor de transmitancia térmica mediante la medición del flujo de calor que atraviesa un determinado cerramiento y las temperaturas de los ambientes que el elemento separa. Se trata de un método con un amplio estudio y aplicación en el campo de la investigación, tal y como se refleja en la literatura científica. En este sentido, se pueden destacar numerosos estudios que utilizan el método termoflujométrico y que evidencian los problemas metrológicos y operacionales relacionados con la realización del ensayo (Ficco et al., 2015; Meng et al., 2015). Además, este método exige un gradiente térmico bastante significativo (Desogus, Mura, & Ricciu, 2011), con diferencias de temperatura superiores a 15 °C (Albatici & Tonelli, 2010; Ficco et al., 2015) que pueden llegar a limitar la aplicación del método en regiones climáticas cálidas como la del mediterráneo.

Ante la dificultad de aplicar el método termoflujométrico, en los últimos años se han desarrollado métodos cuantitativos mediante el uso de la termografía infrarroja (Albatici & Tonelli, 2010; Dall'O', Sarto, & Panza, 2013; Fokaides & Kalogirou, 2011; Madding, 2008). En estos métodos se emplea la termografía infrarroja para medir principalmente la temperatura superficial, aunque también se pueden medir otras variables, como la emisividad o la temperatura aparente reflejada.

Finalmente, se encuentra el método termométrico³, el cual consiste en la obtención del valor de transmitancia térmica mediante la medición de la temperatura superficial interior del cerramiento y las temperaturas de los ambientes que el elemento separa. Se trata de un método ampliamente utilizado a nivel profesional en España.

A pesar de la oportunidad que suponen los métodos experimentales para realizar estimaciones precisas de la transmitancia térmica, se detectó una brecha de conocimiento con relación a diferentes aspectos relacionados con estos.

En primer lugar, la falta de estudios acerca del método termométrico evidencia una debilidad en el planteamiento que, a pesar de tener un amplio uso a nivel profesional a través de los equipos desarrollados por diversos fabricantes, no disponen de un apoyo por parte de investigaciones que avalen su uso. Asimismo, la posibilidad de disponer de nuevos planteamientos de análisis de datos similares al método termoflujométrico permitiría dotar al método termométrico con una mayor riqueza a la hora de evaluar *in situ* los cerramientos.

En segundo lugar, el método cuantitativo mediante termografía infrarroja presenta una amplia variedad de planteamientos que pueden dificultar su unificación en una única metodología. En este sentido, existen varios planteamientos en la literatura científica que realizan mediciones desde el exterior y el interior de la fachada, empleando hasta un total de 8 expresiones.

En tercer lugar, a pesar de las limitaciones que presenta el método de estimación teórica, su aplicación puede ser útil como valor de referencia en las evaluaciones *in situ*. El apartado 7.3 de la ISO 9869-1:2014 plantea la utilización de dicho valor para comparar si existe una desviación inferior al 20 % entre el valor medido *in situ* y el valor teórico y añade que, si la diferencia es superior, pueden existir errores durante el proceso de monitorización. Por lo tanto, su uso no se debe descartar por parte del personal técnico e investigador, aunque se debe

³ El término "método termométrico" fue asignado por el investigador Roberto Rodríguez Álvaro en su Trabajo de Fin de Máster titulado *Estudio Comparativo entre Métodos de Evaluación de Transmitancia Térmica en Cerramientos Opacos de Edificios Existentes* en la edición del curso académico 2015-2016 del Máster Universitario en Gestión Integral de la Edificación de la Universidad de Sevilla.

dotar de procedimientos de determinación más precisos y útiles ante la caracterización de cerramientos de los que se desconoce con exactitud su composición constructiva.

Así pues, esta tesis doctoral pretende contribuir al conocimiento existente sobre los métodos de caracterización térmica de los elementos de la envolvente de los edificios mediante el análisis de los tres puntos indicados anteriormente. Para ello, estas brechas de conocimiento detectadas se abordaron a través de una serie de campañas experimentales realizadas en el contexto del clima mediterráneo. Asimismo, se consideró la posibilidad de utilizar algoritmos de aprendizaje automático ante determinadas cuestiones con el objeto de optimizar y automatizar ciertos procesos.

La estructura de la tesis doctoral es la siguiente: en el Apartado 2 se presenta una descripción más detallada del contexto actual de la problemática energética de los edificios y de los objetivos establecidos para la reducción de su consumo energético a nivel internacional. En el Apartado 3 se recogen dos de las investigaciones de contextualización realizadas en el marco de la tesis, las cuales destacan la importancia y la influencia que tienen las propiedades térmicas de la envolvente en el consumo energético y en las condiciones de habitabilidad. Posteriormente, en el Apartado 4 se revisa de manera detallada el estado de la cuestión en relación con los métodos de caracterización térmica de la transmitancia térmica. A continuación, en el Apartado 5 se plantean los objetivos de la tesis doctoral y en el Apartado 6 se describe tanto la metodología llevada a cabo en las diferentes investigaciones como los casos de estudio. Finalmente, en el Apartado 7 se realiza el análisis y la discusión de los resultados obtenidos, y en los Apartados 8 y 9 se definen las principales conclusiones de la investigación y sus futuras líneas, respectivamente. Dado que esta tesis doctoral se presenta mediante la modalidad de compendio de publicaciones, los resultados expuestos en el Apartado 7 son una síntesis de las publicaciones compendiadas. Para que el lector pueda disponer de una información más detallada acerca de estas publicaciones, se incluye una copia completa de estas en la documentación anexa.



2. Justificación de la problemática energética de los edificios

2.1. Degradación ambiental y cambio climático

Desde la antigüedad, el ser humano ha intentado aprovechar al máximo los recursos de la naturaleza para su propio beneficio, pero siempre dentro de unos límites que permitían asegurar la sostenibilidad del entorno. Sin embargo, desde la revolución industrial, el equilibrio existente entre el ser humano y la naturaleza ha desaparecido, principalmente por la necesidad de la sociedad de satisfacer su creciente producción a través de la explotación desmedida de los recursos naturales de la biosfera (McDonough & Braungart, 2002). Esta interacción de la sociedad con el entorno está generando un impacto negativo sobre la naturaleza, provocando la aceleración del calentamiento global, el cambio climático y la extinción de diferentes especies (WWF, 2014), así como aspectos sociales y demográficos, como los refugiados ambientales. Asimismo, desde hace cuarenta años se ha superado la capacidad de los recursos de la Tierra (WWF, 2014), lo cual refleja la insostenibilidad del sistema de vida de la sociedad del siglo XXI. Ante esto, las grandes potencias económicas se preocupan cada vez más por la excesiva dependencia de los recursos fósiles, ya que tienen que recurrir a su importación procedente de países con una actividad política inestable. Este hecho conlleva a estar sujeto a potenciales crisis económicas, tales como las del petróleo de 1973 y de 1979.

Además, los posibles escenarios de evolución del clima a lo largo del siglo XXI no son alentadores. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007), dichos escenarios (es decir, los escenarios B1, A1T, B2, A1B, A2 y A1FI) plantean para final del siglo XXI un incremento de la temperatura de entre 1,1 °C y 6,4 °C, así como del nivel del mar de entre 0,18 m y 0,59 m con respecto a los valores de finales del siglo XX.

Una de las principales causas de esta situación cada vez más extrema es la constante emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. En esta línea, numerosos sectores se caracterizan por tener unos porcentajes elevados de emisiones de gases de efecto invernadero. Por consiguiente, los organismos internacionales han centrado sus esfuerzos en establecer objetivos y metas para la población mundial con el fin de alcanzar un desarrollo más sostenible que asegure la protección del medio ambiente. Un ejemplo de esta nueva tendencia de la sociedad son los diversos congresos y convenciones internacionales realizados en los últimos veinticinco años, los cuales han desembocado en tratados, tales como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París. En este último se definieron objetivos exigentes para garantizar el mantenimiento del clima frente al progresivo aumento de las temperaturas. Uno de los objetivos consistía, como mínimo, en mantener el incremento de la temperatura por debajo de 2 °C con respecto a épocas preindustriales (es decir, anterior al año 1750). Esto es considerando el peor de los escenarios posibles, ya que el acuerdo insta a conseguir un aumento de tan solo 1,5 °C. Es conveniente destacar que estos valores son diferentes de los incrementos de temperatura previstos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, el cual utiliza como valores de referencia el valor promedio de las temperaturas de finales del siglo XX.

Por lo tanto, el Acuerdo de París obliga a que los 195 países desarrollen estrategias y políticas encaminadas a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos productivos. En este sentido, los 195 países establecieron objetivos exigentes para alcanzar una economía hipocarbónica para el año 2050. No obstante, la realidad refleja que el alcance de un desarrollo sostenible está lejos de producirse. En el informe *United in Science* (World Meteorological Organization, 2019), publicado en la Cumbre sobre la Acción Climática 2019 de la Organización de las Naciones Unidas, se reflejaron datos desalentadores: un crecimiento anual del 1 % en las emisiones de CO₂, un predominio del consumo de combustibles fósiles (a pesar del crecimiento de las energías renovables) y un aumento del CO₂, del CH₄ y del N₂O de un

146 %, un 275 % y un 122 %, respectivamente, con respecto a épocas preindustriales (es decir, anteriores al año 1750).

2.2. El sector de la edificación y su desempeño energético

Ante este paradigma internacional, la sociedad se plantea la necesidad de analizar y actuar sobre todas aquellas actividades, procesos y tareas con unos niveles importantes de emisión de gases de efecto invernadero y de consumo de recursos energéticos.

De entre las diferentes actividades que realiza el ser humano, la construcción es una de las más significativas al tratarse de uno de los sectores más complejos y con mayor repercusión en la sociedad. Además, se encuentra inmerso en un constante proceso de desarrollo.

Aproximadamente, el 40 % del consumo total de la energía procedente de las actividades humanas se atribuye al sector de la edificación (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008), el cual genera el 38 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (United Nations Environment Programme, 2012). En 2010, el consumo energético global de dicho sector fue de 23,7 PWh y se estima que, en el año 2040, dicha cantidad podría llegar a 38,4 PWh (International Energy Agency, 2013).

Una de las tipologías de edificaciones más representativas son las de tipo residencial, ya que son construcciones en las que las personas pasan la mayor parte de su tiempo. En este sentido, es especialmente importante tener en cuenta que las diversas pautas de comportamiento de los usuarios pueden conllevar a un impacto significativo en el uso de la energía (Richardson, Thomson, & Infield, 2008; Richardson, Thomson, Infield, & Clifford, 2010).

Asimismo, aunque las variaciones en el consumo energético pueden deberse a cuestiones de tipo constructivo (Besagni & Borgarello, 2018), los factores socioeconómicos pueden también influir en el consumo energético de la vivienda (Brounen, Kok, & Quigley, 2012; Filippini & Pachauri, 2004). Por lo tanto, la relación existente entre la demanda energética del edificio, los patrones de comportamiento de los usuarios y los factores sociales y económicos pueden afectar de manera significativa a este tipo de consumo. Esto cobra una mayor relevancia si se considera el efecto que tiene el comportamiento de las viviendas a una escala global (Besagni & Borgarello, 2018), ya que pequeñas variaciones pueden suponer ahorros significativos.

El deficiente desempeño se refleja en el elevado consumo energético registrado en los edificios en los últimos años. Con respecto a la Unión Europea, los edificios residenciales representaron el 25,7 % del consumo total de la energía primaria en Europa en el año 2016 (European Environment Agency, 2018). Además, cabe destacar que, como tendencia general, desde el año 1990 el consumo total energético sufre un incremento anual del 1 % con un pico del 2,5 % en relación con la demanda eléctrica (European Environment Agency, 2018) (véase Figura 1). Esto refleja la progresiva pérdida de rendimiento energético del parque inmobiliario europeo.

En el caso de España, existe cierta similitud a la mostrada por el resto de los países de la Unión Europea. Según los datos recopilados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía en España (IDAE, 2019), el sector residencial en España fue responsable del 18,33 % de la energía total consumida en el país en el año 2016 (véase Figura 2), procediendo el 18,41 % de fuentes renovables. Asimismo, el sector se ubica en el tercer lugar dentro de los sectores con un mayor consumo energético, únicamente superado por el conjunto del sector industrial (23,01 %) y por el del transporte (42,27 %).

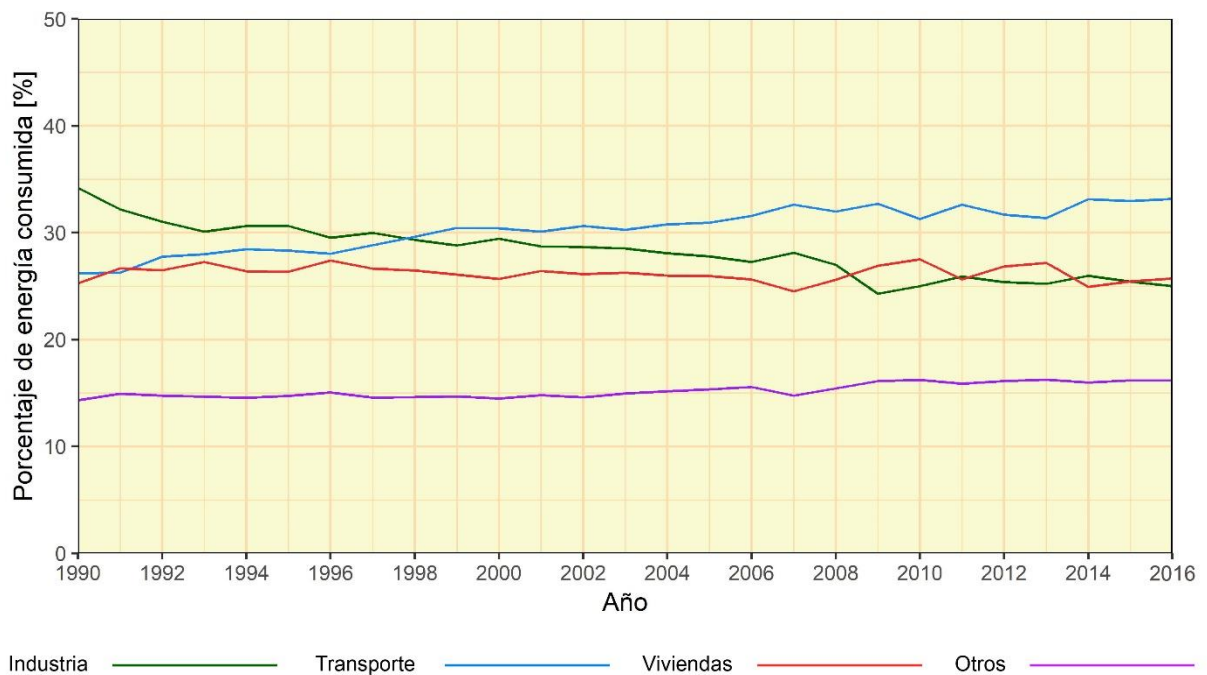


Figura 1. Consumo energético final en Europa por sectores. Fuente: propia, elaborada a partir de los datos de la European Environment Agency (2018).

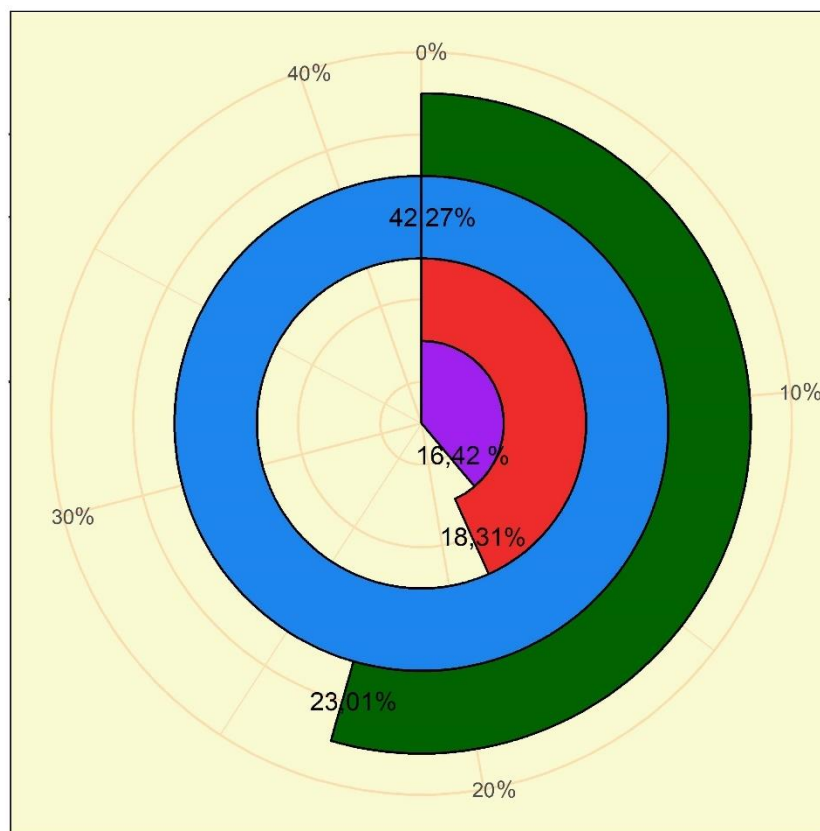


Figura 2. Consumo energético final en España por sectores en el año 2016. Fuente: propia, elaborada a partir de los datos del IDAE (2019).

Dado que la mayor parte de la energía consumida en la fase de uso de los edificios residenciales procede de recursos no renovables, es necesario reducir el consumo energético en el parque inmobiliario existente. En este contexto, la comunidad internacional ha intensificado sus esfuerzos para reducir los aumentos de las emisiones de CO₂ y del consumo energético asociado al sector de la construcción.

Por su parte, la Unión Europea ha definido los pasos necesarios para alcanzar una economía baja en carbono (hipocarbónica) para el año 2050 (European Commission, 2011). Para poder alcanzar este objetivo, es imprescindible disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en diferentes sectores, tales como la industria, el transporte o la edificación. En el caso de los edificios, la Unión Europea pretende alcanzar una reducción de un 90 % en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990. Recientemente, la Directiva 2018/844 (European Union, 2018) ha establecido la necesidad de que los países europeos diseñen estrategias de renovación energética del parque inmobiliario existente con el objeto de disponer de edificios eficientes antes del 2050. En este sentido, la adopción de medidas de ahorro energético constituye una de las actuaciones más significativas, así como el diseño de edificios nuevos altamente eficientes. Esta directiva es la continuación de otras directivas impulsadas por la Unión Europea con vistas a reducir el consumo energético de los edificios.

Por lo tanto, el principal marco que debe orientar y facilitar el alcance de un sector residencial hipocarbónico es la reglamentación estatal en eficiencia energética de edificios. Según la Directiva 2010/31/UE (European Union, 2010), todos los estados miembros deberán definir en sus reglamentaciones estatales la obligatoriedad de que los edificios nuevos o a rehabilitar sean edificios de consumo casi nulo en las siguientes fechas:

- Después del 31 de diciembre de 2018 en los edificios públicos.
- Después del 31 de diciembre de 2020 en todos los edificios nuevos.

No obstante, las limitaciones para su aplicación en climas cálidos suponen un reto para la comunidad científica y tecnológica (Zacà, D'Agostino, Congedo, & Baglivo, 2015). En esta línea, Attia et al. (2017) reflejaron el problema que tienen la mayor parte de los países del sur de Europa para establecer regulaciones específicas encaminadas a la correcta implantación de edificios de consumo casi nulo.

Dado que estas definiciones están orientadas hacia un equilibrio entre la energía consumida y la producida, se deben plantear diseños que garanticen un consumo energético nulo de los edificios. De los diferentes tipos de consumo energético que caracterizan los edificios, el consumo de los sistemas de climatización destaca por encima del resto (Kurekci, 2016; Vine & Kazakevicius, 1999). Asimismo, el consumo de este tipo de equipos depende, entre otros aspectos, de la demanda energética que tenga el edificio, la cual está estrechamente relacionada con las propiedades térmicas de la envolvente.

3. Contexto actual de la transmitancia térmica

Las propiedades térmicas de la envolvente constituyen una de las principales estrategias de diseño empleadas tanto por instituciones y organismos como por profesionales, con el objeto de mejorar el rendimiento de los edificios. Dentro de las propiedades térmicas de la envolvente, las dos variables con una mayor utilización son:

- La resistencia térmica. Esta variable establece el nivel de oposición que tiene un elemento de la envolvente al transmitir el calor a través de sí mismo (AENOR, 1996).
- La transmitancia térmica. Esta variable determina la cantidad de calor que fluye a través de un determinado elemento por unidad de tiempo y superficie (AENOR, 1996).

Asimismo, estas variables están muy correlacionadas (la transmitancia térmica puede entenderse como la inversa de la resistencia térmica en elementos con una transferencia unidimensional del flujo de calor).

Tal y como se ha comentado en el Apartado 2, el parque de edificios existentes no responde a las necesidades más recientes de la sociedad, lo que conlleva a importantes impactos económicos y ambientales. El desempeño energético de los edificios existentes y el elevado consumo energético asociado a los sistemas de climatización obliga a reflexionar sobre las posibles causas que pueden desembocar en este elevado consumo energético. Es en este punto donde el diseño pasivo de los edificios adquiere una mayor importancia a través de su envolvente. En este sentido, de los diferentes elementos que componen los edificios, los elementos de la envolvente contribuyen en gran proporción al ineficiente desempeño energético del parque inmobiliario existente, debido a las pérdidas o ganancias de calor que tienen lugar a través de ellos.

Esta tesis doctoral, por tanto, plantea la necesidad de disponer de una mayor justificación acerca de la influencia que tienen las propiedades térmicas de la envolvente no solo desde el punto de vista energético, sino también desde el punto de vista de salubridad del espacio interior. Por este motivo, se realizaron dos investigaciones introductorias orientadas al análisis de los parámetros térmicos establecidos en las reglamentaciones estatales, así como a la influencia de las propiedades térmicas de un cerramiento de una vivienda social en los niveles de salubridad interior, tanto en la actualidad como en futuros escenarios de cambio climático.

3.1. El marco regulatorio a nivel internacional de las propiedades térmicas de la envolvente y su influencia en el desempeño energético⁴

Los países son motores que pueden garantizar un adecuado rendimiento energético de los edificios a través de las regulaciones que desarrollan, en las cuales deben poner especial

⁴ Todo lo reflejado en el subapartado 3.1. corresponde a la siguiente publicación compendiada dentro del marco de esta tesis:

- Bienvenido-Huertas, D., Oliveira, M., Rubio-Bellido, C., & Marín, D. (2019). A comparative analysis of the international regulation of thermal properties in building envelope, *Sustainability*, 11, 5574. doi: 10.3390/su11205574

Esta investigación se realizó en las primeras fases de desarrollo de la tesis (aunque finalizada y publicada en una fase final), con el objetivo de disponer de un conocimiento detallado de la importancia de las propiedades térmicas de los edificios a nivel internacional y de la verdadera influencia que supone establecer diferentes valores límites.

atención en la limitación del consumo energético de los edificios (Pablo-Romero, Pozo-Barajas, & Yñiguez, 2017). En este sentido, y dada la importancia que tienen en el desempeño energético de los edificios, las características térmicas de la envolvente constituyen uno de los principales instrumentos reguladores debido a la facilidad para establecer limitaciones en sus propiedades (De Lieto Vollaro et al., 2015; Escorcía et al., 2012; Friedman, Becker, & Erell, 2014; Pacheco, Ordóñez, & Martínez, 2012).

No obstante, se pueden encontrar diferencias significativas entre las reglamentaciones de los países, tanto europeos como sudamericanos. A pesar de que el esquema de funcionamiento es común (configurar valores límites en función de la zona climática (Rodríguez-Soria, Domínguez-Hernández, Pérez-Bella, & Del Coz-Díaz, 2014)), las reglamentaciones presentan claras diferencias entre sí que pueden desembocar en la existencia de desigualdades energéticas entre países vecinos y con características climáticas similares. La existencia de desigualdades energéticas entre países reflejaría la influencia que tienen las propiedades térmicas de la envolvente.

Por este motivo, se analizaron las reglamentaciones energéticas de 3 países sudamericanos y de 3 países europeos. Los países sudamericanos seleccionados fueron Argentina, Brasil y Chile por ser los que tienen una mayor superficie de territorio, por disponer de una normativa consolidada en materia de eficiencia energética y por ser los países sudamericanos con un mayor consumo de electricidad per cápita en los últimos años (International Energy Agency (IEA), 2018). Los países europeos seleccionados fueron España, Portugal y Francia por su proximidad geográfica (lo cual permite establecer patrones de similitud en sus condiciones climáticas), por las dificultades de implantación de políticas de edificios de consumo casi nulo en estas regiones (Attia et al., 2017) y por disponer de reglamentaciones en materia de eficiencia energética de la envolvente con características similares.

A continuación, se realiza una breve exposición de las reglamentaciones y de los valores límites regulados en cada país.

3.1.1. Francia

En Francia, la reglamentación que incluye los requisitos que deben cumplir los edificios es el código denominado *Code de la construction et de l'habitation* (Republique Française, 2019). En esta reglamentación se definen varios requisitos básicos relacionados con la edificación, tales como la seguridad estructural o la eficiencia energética. En el caso de este último, los valores límites establecidos en la reglamentación han sufrido continuas actualizaciones.

Respecto a las propiedades termofísicas, en el decreto denominado *Arrêté du 22 mars 2017* (Republique Française, 2017) se actualizaron los niveles de rendimiento térmico y energético que el artículo R 131-28 del *Code de la construction et de l'habitation* debía alcanzar. Así pues, se actualizaron, entre otros aspectos, los valores límites de las propiedades termofísicas de los elementos opacos y de las aberturas de la envolvente de los edificios (véase Tablas 1 y 2). También se marcaron mayores restricciones para aquellos edificios que se construyan a partir del 1 de enero de 2023 (véase Tabla 3), de manera que se define la hoja de ruta a nivel de prestaciones térmicas de la envolvente de los edificios que el país tendrá en los próximos años. A diferencia de la mayoría de las reglamentaciones de otros países, la variable que se utiliza para establecer restricciones en los elementos opacos es la resistencia térmica (únicamente para vidrios se considera la limitación a través de la transmitancia térmica).

Elemento	Resistencia térmica mínima [(m ² K)/W]		
	Zona térmica		
	H1a, H1b y H1c	H2a, H2b, H2c, H2d y H3 a una altitud superior a 800 m	H3 a una altitud inferior a 800 m
Muros	2,9	2,9	2,2
Muros en contacto con volumen no calentado	2	2	2
Cubiertas horizontales	3,3	3,3	3,3
Cubiertas inclinadas	4,4	4,3	4
Suelos en contacto con aire o espacio no calefactado	2,7	2,7	2,1

Tabla 1. Valores mínimos de resistencia térmica de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación francesa). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Tipo de vidrio	Transmitancia máxima [W/(m ² K)]	térmica
Ventanas de superficie superior a 0,5 m ² , ventanas francesas, ventanas dobles	1,9	
Puerta de entrada de la casa unifamiliar que se abre hacia el exterior	2,0	
Dosel	2,5	
Veranda	2,5	

Tabla 2. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos acristalados de edificios (regulación francesa). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Elemento	Resistencia térmica mínima [(m ² K)/W]		
	Zona térmica		
	H1a, H1b y H1c	H2a, H2b, H2c, H2d y H3 a una altitud superior a 800 m	H3 a una altitud inferior a 800 m
Muros	3,2	3,2	2,2
Muros en contacto con volumen no calentado	2,5	2,5	2,5
Cubiertas horizontales	4,5	4,3	4
Cubiertas inclinadas	5,2	4,5	4
Suelos en contacto con aire o espacio no calefactado	3	3	2,1

Tabla 3. Valores mínimos de resistencia térmica de los elementos opacos de la envolvente de edificios a partir del 1 de enero de 2023 (regulación francesa). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Como se puede apreciar, las limitaciones de las propiedades termofísicas de la envolvente dependen de la zona climática en la que se encuentre ubicado el edificio. La clasificación climática del país viene regulada en el decreto denominado *Arrêté du 26 octobre 2010* (Republique Française, 2010). En este decreto, el clima se divide en tres zonas para el invierno (H1, H2 y H3) y en cuatro zonas para el verano (a, b, c y d). De las diferentes combinaciones se obtiene un total de 8 zonas climáticas (véase Figura 3).

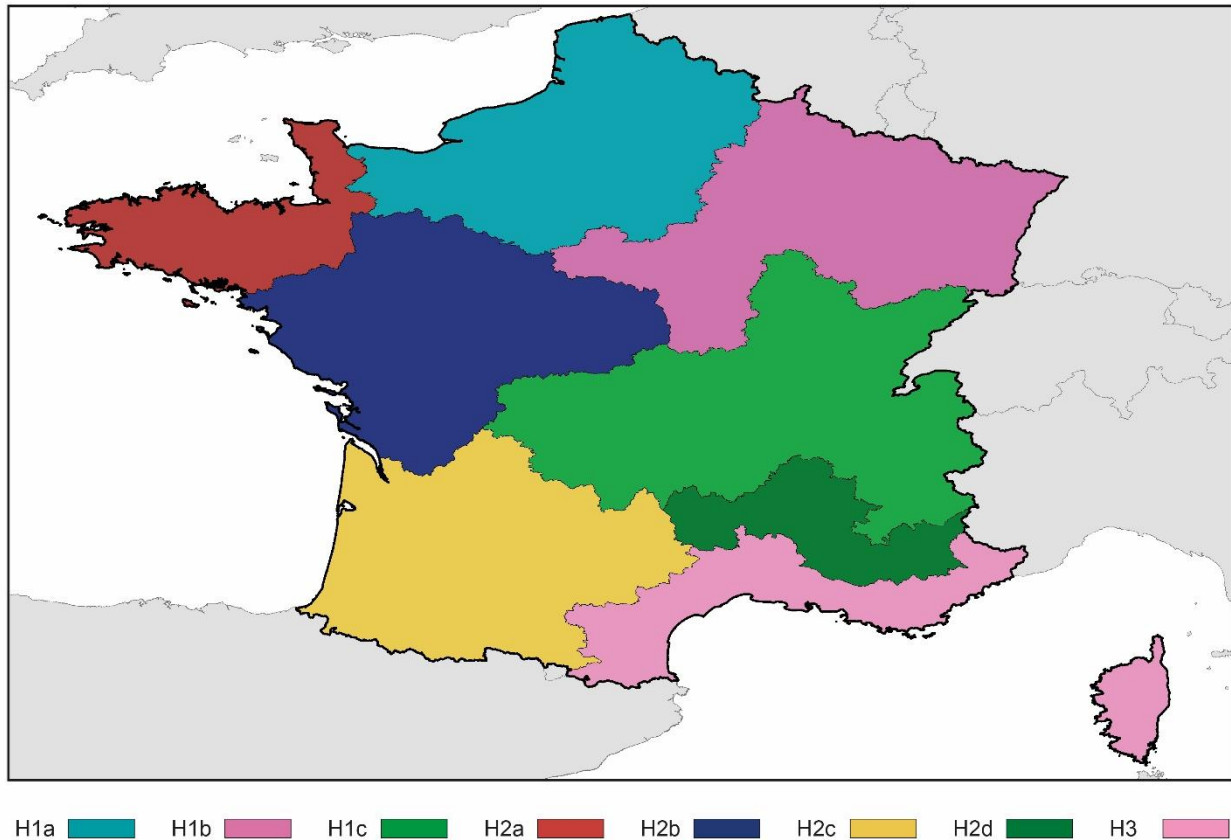


Figura 3. Clasificación climática en Francia. Fuente: Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019).

3.1.2. Portugal

En Portugal, la reglamentación energética de los edificios viene desarrollada en el Decreto 118/2013 (Ministério da Economia e do Emprego, 2013). Esta normativa suponía la transposición de la Directiva 2010/31/UE en Portugal. Recientemente, algunos artículos de esta ley fueron modificados con el Decreto-Ley 251/2015 (Ministério do Ambiente, 2015).

En relación con las propiedades termofísicas de la envolvente, la regulación *Portaria 379-A/2015* estableció los valores límites que deben tener los elementos de la envolvente. A partir del 31 de diciembre de 2015, las propiedades termofísicas de los elementos opacos y acristalados de la envolvente quedaban reguladas con los valores límites dispuestos en la Tabla I.05B de la regulación *Portaria 379-A/2015* (véase Tabla 4). Estos valores límites se definen en función de la zona climática en la que se encuentre ubicado el edificio.

La clasificación climática en Portugal viene desarrollada en el Decreto 80/2006 (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 2006), en el cual se establecen tres zonas climáticas por cada tipo de estación (véase Figura 4): tres de invierno (I1, I2 e I3) y tres de verano (V1, V2 y V3). Cada una de las ciudades de Portugal pertenece a una zona climática diferente de verano y de invierno. Asimismo, la clasificación de cada índice se realiza en función de los grados de calefacción para invierno y de la temperatura exterior para verano. El indicador numérico determina la severidad de cada clima, siendo los climas más severos los que tienen el valor más alto. También, al igual que ocurre en otras regulaciones, se hace una distinción entre los valores límites de las propiedades termofísicas de los edificios construidos en su territorio y de aquellos construidos en territorios insulares.

Elemento	Transmitancia térmica máxima [W/(m ² K)]					
	Portugal continental			Regiones autónomas		
	Zona climática			Zona climática		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3
Muros	0,50	0,40	0,35	0,70	0,60	0,45
Cubiertas	0,40	0,35	0,30	0,45	0,40	0,35
Vidrios	2,80	2,40	2,20	2,80	2,40	2,20

Tabla 4. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos opacos y acristalados de la envolvente de edificios (regulación portuguesa). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

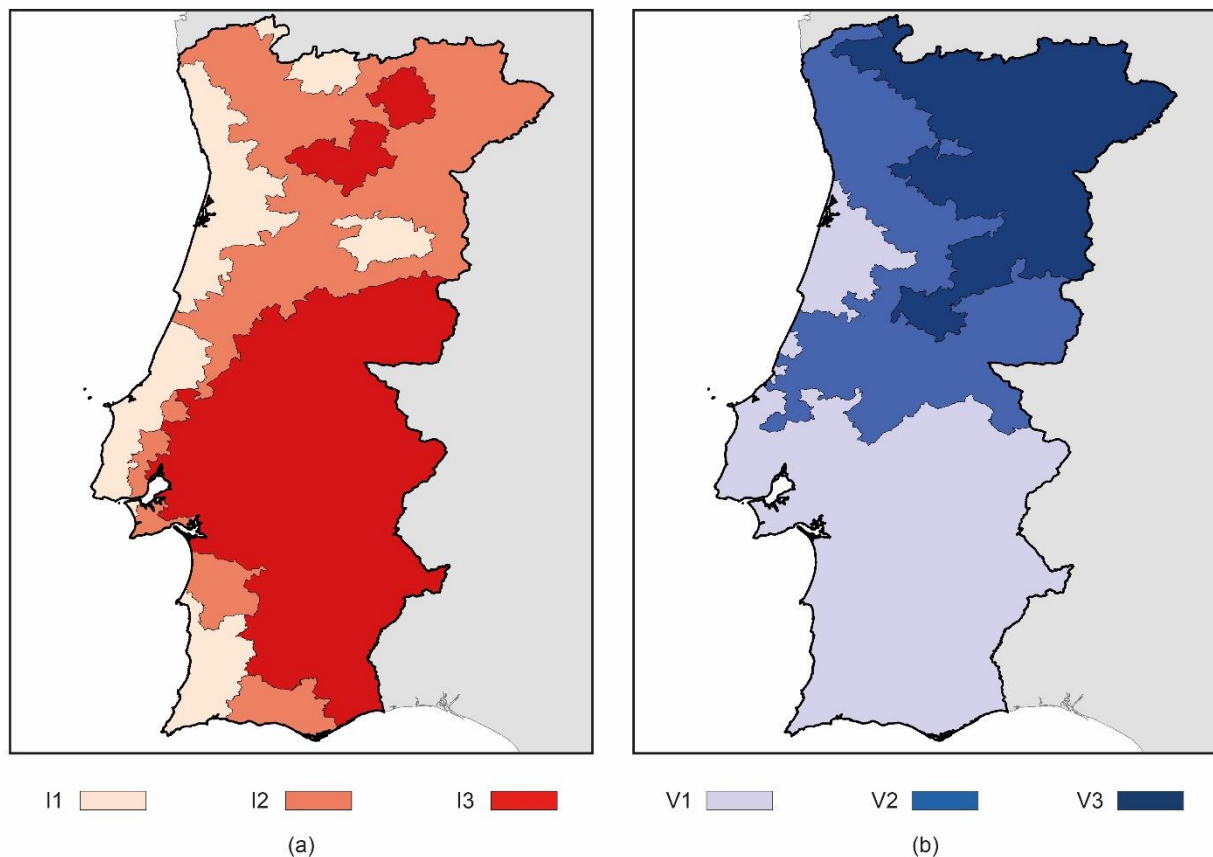


Figura 4. Clasificación climática en Portugal: (a) invierno y (b) verano. Fuente: Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019).

3.1.3. España

La reglamentación en materia de eficiencia energética de los edificios en España se implantó en el año 1979 a través del Real Decreto 2429/79 (Gobierno de España, 1979). En este decreto se zonificaba el país en 5 regiones diferentes y se establecían diferentes valores límites de transmitancia térmica. Este Real Decreto estuvo vigente hasta el año 2006 cuando entró en vigor el Real Decreto 314/2006 (Gobierno de España, 2006), el cual se desarrolla en una serie de documentos básicos entre los que se encuentra el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB HE). Tanto en la versión de 2006 como en las revisiones posteriores de 2013 y de 2019 (fecha estimada de publicación de la nueva actualización), se realiza una clasificación climática del país en función de la severidad climática de invierno y de verano, calculada según

los grados días de calefacción y de refrigeración. La clasificación se lleva a cabo distinguiendo 5 zonas de invierno (A, B, C, D y E) y 4 zonas de verano (1, 2, 3 y 4), siendo las zonas más severas las que tienen una mayor letra (p. ej., E en invierno) o un mayor número (p. ej., 4 en verano). De las diferentes combinaciones de clasificaciones de invierno y de verano se obtiene un total de 12 zonas climáticas (véase Figura 5).

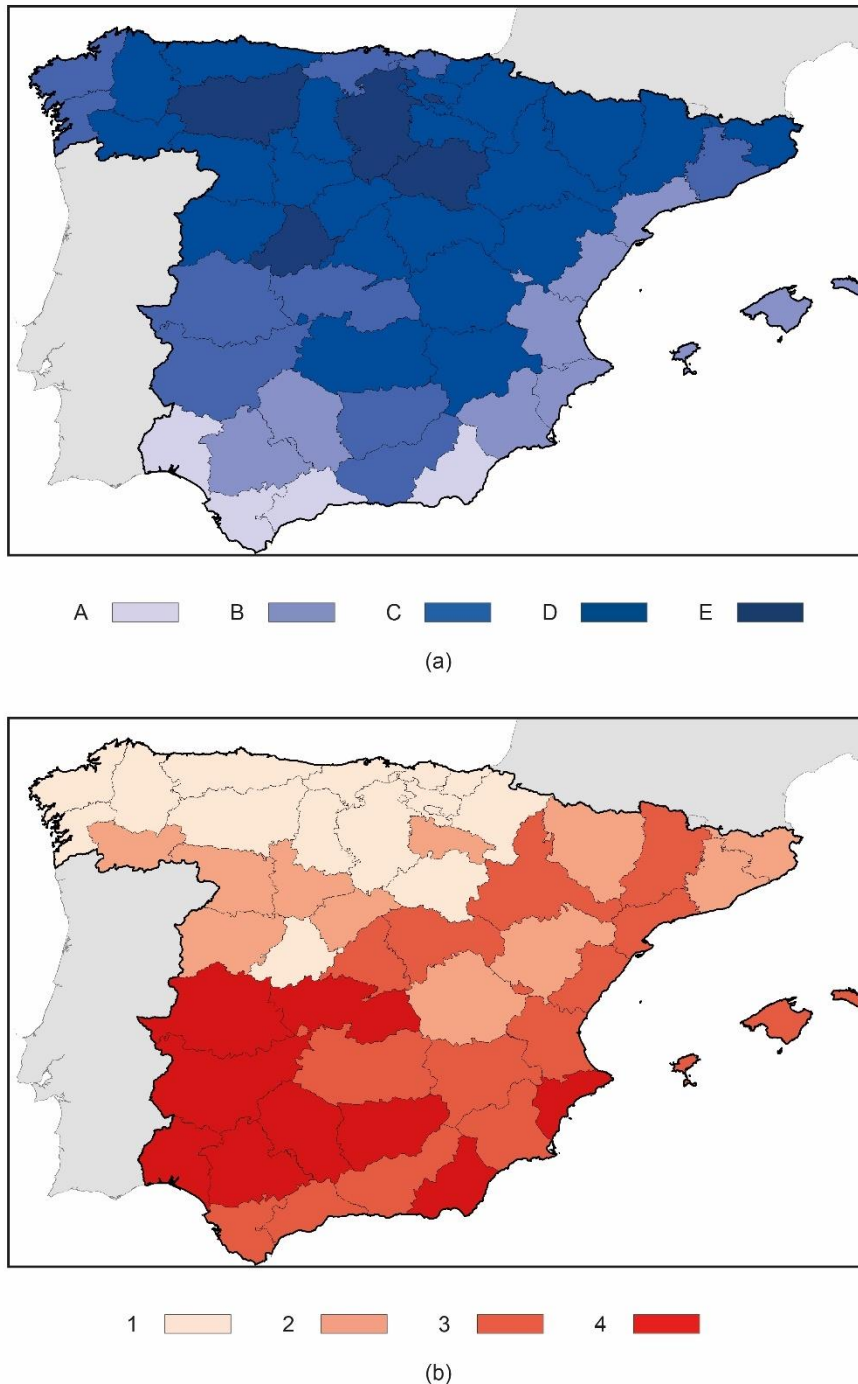


Figura 5. Clasificación climática en España: (a) invierno y (b) verano. Fuente: Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019).

En el mismo DB HE se establecen los valores límites de transmitancia térmica de los elementos de la envolvente (véase Tabla 5). Estos valores límites se asignan en función de la zona climática de invierno en la que se encuentre ubicado el edificio. Asimismo, la aplicación de

estas limitaciones abarca tanto edificios de nueva construcción como intervenciones en edificios existentes.

Elemento	Transmitancia térmica máxima [W/(m ² K)]				
	Zona climática de invierno				
	A	B	C	D	E
Muro	1,25	1,00	0,75	0,60	0,55
Elementos en contacto con el terreno	1,25	1,00	0,75	0,60	0,55
Cubierta	0,80	0,65	0,50	0,40	0,35
Suelo en contacto con aire	0,80	0,65	0,50	0,40	0,35
Ventana	5,70	4,20	3,10	2,70	2,50

Tabla 5. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos opacos y acristalados de la envolvente de edificios (regulación española). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

3.1.4. Chile

Chile fue de los primeros países sudamericanos en tener un amplio desarrollo en materia de eficiencia energética de los edificios. En este sentido, en el año 1976 se aprobó la zonificación climática de Chile a través de la norma NCh 1079 (Instituto Nacional de Normalización (Chile), 2008). Esta norma, revisada en el año 2008, establece la clasificación climática del país en 9 zonas (véase Figura 6), las cuales presentan claras diferencias. Asimismo, la topografía de Chile tiene una gran influencia en las características climáticas de las regiones (precipitaciones, temperaturas, radiación solar, etc.), tal y como reflejan varios estudios (Dahlgren, Boettinger, Huntington, & Amundson, 1997; Franzmeier, Pedersen, Longwell, Byrne, & Losche, 1969; Tsui, Chen, & Hsieh, 2004; Yimer, Ledin, & Abdelkadir, 2006). Por tanto, en Chile existen diferentes microclimas, ya que su altitud oscila entre los 0 y los 6.000 metros sobre el nivel del mar (Zurita et al., 2018). En el caso de la clasificación climática, no se hace una distinción en función de las severidades climáticas de invierno y de verano (como realizan otros países), sino que se divide el país según las características bioclimáticas propias de cada región.

Por su parte, en la norma NCh 1079 (Instituto Nacional de Normalización (Chile), 2008) se definen los requerimientos térmicos de la envolvente de los edificios (véase Tabla 6). Cabe señalar que la limitación de las propiedades termofísicas de las aberturas va asociada al porcentaje de superficie máximo permitido en función del tipo de vidrio y de la zona climática en la que se encuentre el edificio.

Elemento	Transmitancia térmica máxima [W/(m ² K)]								
	Zona climática								
	An	CI	CL	ND	NL	NVT	SE	SI	SL
Muro	0,30	0,60	0,80	0,50	2,00	0,80	0,40	0,50	0,60
Cubierta	0,25	0,50	0,60	0,40	0,80	0,60	0,25	0,30	0,40
Suelo en contacto con aire	0,40	0,80	1,20	0,70	3,00	1,20	0,50	0,70	0,80
Ventana	2,40	3,00	3,00	3,00	5,80	3,00	2,40	3,00	3,00

Tabla 6. Valores máximos de transmitancia térmica de los elementos opacos y acristalados de la envolvente de edificios (regulación chilena). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

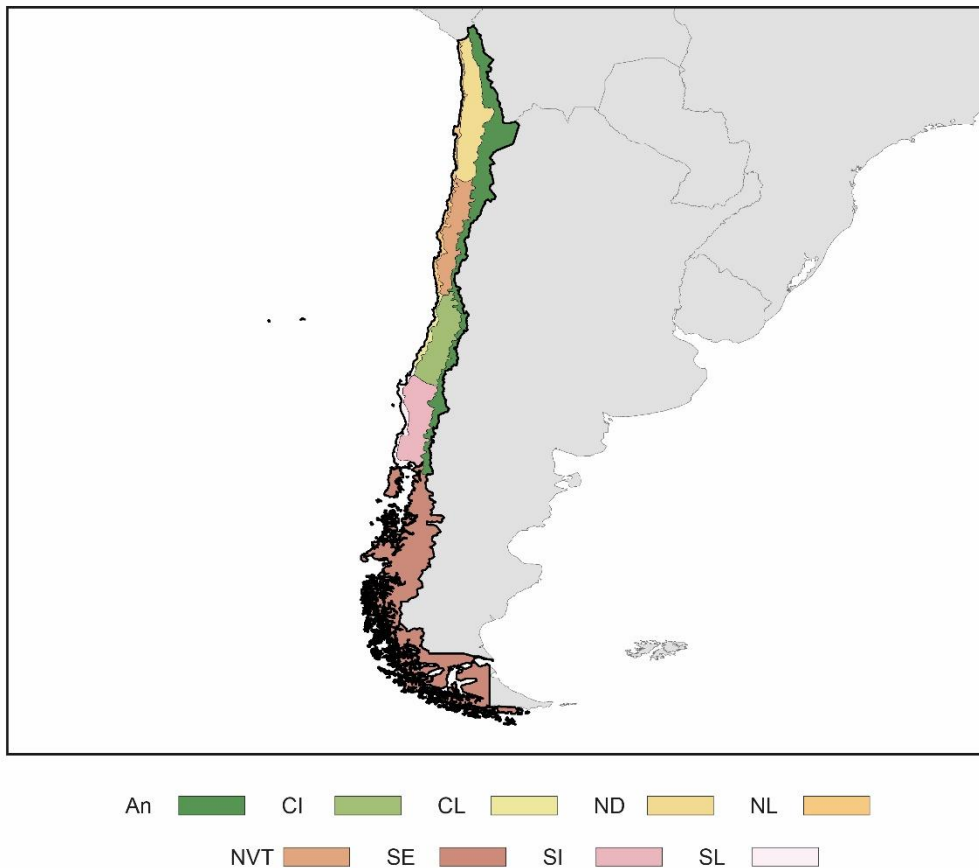


Figura 6. Clasificación climática en Chile. Fuente: Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019).

3.1.5. Argentina

Junto con Chile, Argentina fue de los primeros países de Sudamérica con un desarrollo reglamentario en materia de eficiencia energética de los edificios. Una de las primeras normas que marcaron los principios energéticos del país se estableció en 1981 a través de la norma IRAM 11603 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2012), en la cual se realizaba una clasificación bioclimática del país en 6 zonas diferentes (véase Figura 7): la zona I se considera la zona más caliente y la zona VI, la más fría.

En una revisión del año 2012, se distinguen 4 subcategorías en las zonas I-IV de acuerdo con las características bioclimáticas propias de cada zona: a (zonas con una amplitud térmica mayor a 14 °C), b (zonas con una amplitud térmica menor a 14 °C), c (zonas de transición desde zonas con mayores amplitudes térmicas a otras menores) y d (zonas costeras con amplitudes bajas durante todo el año). Además, la IRAM 11603 daba pautas generales relacionadas con el diseño de la envolvente, con la evaluación de las orientaciones favorables y con el cumplimiento de asoleamiento mínimo de los edificios destinados a vivienda.

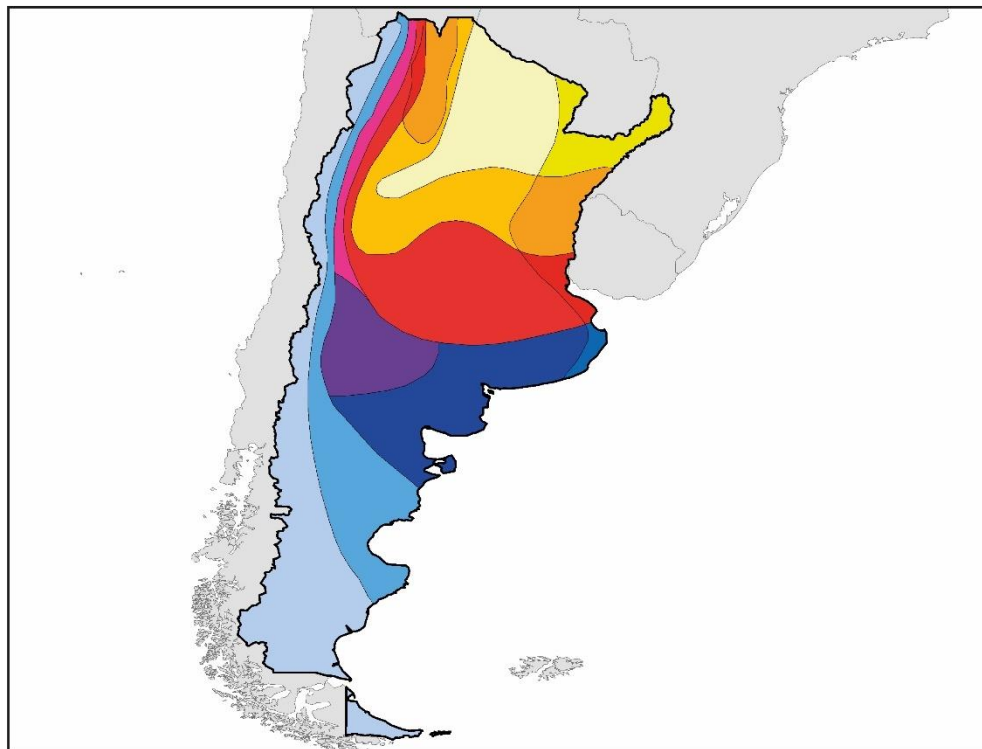


Figura 7. Clasificación climática en Argentina. Fuente: Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019).

Sin embargo, el desarrollo posterior de la norma IRAM 11605 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1996) estableció limitaciones más restrictivas acerca de las propiedades térmicas de los elementos opacos. La norma define valores límite para la transmitancia térmica de muros y techos en función de tres niveles de confort: A (recomendado), B (medio) y C (mínimo). Asimismo, se hacen distinciones en los valores límites de transmitancia térmica para las estaciones de verano y de invierno (véase Tablas 7 y 8).

Como se puede apreciar, los valores límites no se asignan en la distinción de la transmitancia térmica de invierno en función de la zona climática, sino en función de la temperatura exterior de diseño definida en la IRAM 11603 para diferentes ciudades. Para un edificio determinado se asignarán los valores más bajos de las dos tablas. Estos valores límites fueron adoptados como obligatorios en el Decreto 1030/10 (Departamento de Infraestructura (Argentina), 2010).

Zona climática	Transmitancia térmica máxima [W/(m²K)]					
	Nivel A		Nivel B		Nivel C	
	Muro	Techo	Muro	Techo	Muro	Techo
I y II	0,45	0,18	1,10	0,45	1,80	0,72
III y IV	0,50	0,19	1,25	0,48	2,00	0,76

Tabla 7. Valores máximos de transmitancia térmica de verano de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación argentina). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Con respecto a las características térmicas de las ventanas, la norma IRAM 11507-4 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2010) establece los valores límites de transmitancia

térmica de los vidrios para diferentes categorías (véase Tabla 9). A su vez, el Decreto 1030/10 indica que los edificios de hasta 10 m de altura pueden tener vidrios de una categoría K5, mientras que, para edificios de tamaños superiores, la categoría mínima es K4.

Temperatura exterior de diseño [°C]	Transmitancia térmica máxima [W/(m²K)]					
	Nivel A		Nivel B		Nivel C	
	Muro	Cubierta	Muro	Cubierta	Muro	Cubierta
-15	0,23	0,20	0,60	0,52	1,01	1,00
-14	0,23	0,20	0,61	0,53	1,04	1,00
-13	0,24	0,21	0,63	0,55	1,08	1,00
-12	0,25	0,21	0,65	0,56	1,11	1,00
-11	0,25	0,22	0,67	0,58	1,15	1,00
-10	0,26	0,23	0,69	0,60	1,19	1,00
-9	0,27	0,23	0,72	0,61	1,23	1,00
-8	0,28	0,24	0,74	0,63	1,28	1,00
-7	0,29	0,25	0,77	0,65	1,33	1,00
-6	0,30	0,26	0,80	0,67	1,39	1,00
-5	0,31	0,27	0,83	0,69	1,45	1,00
-4	0,32	0,28	0,87	0,72	1,52	1,00
-3	0,33	0,29	0,91	0,74	1,59	1,00
-2	0,35	0,30	0,95	0,77	1,67	1,00
-1	0,36	0,31	0,99	0,80	1,75	1,00
≥0	0,38	0,32	1,00	0,83	1,85	1,00

Tabla 8. Valores máximos de transmitancia térmica de invierno de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación argentina). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Categoría	Transmitancia térmica máxima [W/(m²K)]
K1	<1,0
K2	$1,0 \leq U \leq 1,5$
K3	$1,5 < U \leq 2,0$
K4	$2,0 < U \leq 3,0$
K5	$3,0 < U \leq 4,0$

Tabla 9. Valores máximos de transmitancia térmica de verano de los elementos acristalados de la envolvente de edificios (regulación argentina). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

3.1.6. Brasil

En Brasil, el primer desarrollo reglamentario acerca de la eficiencia energética de los edificios tuvo lugar en el año 2005 mediante la norma NBR 15220 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005). En dicha norma se establecían las características técnicas que debían tener las viviendas sociales construidas en el país, las cuales se asignaban de manera diferente a través de una clasificación climática que divide el país en 8 zonas (véase Figura 8).

Posteriormente, en el año 2008 y en la versión revisada del año 2013, la norma NBR 15575 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013) especificó las características térmicas que deben tener los edificios. En concreto, se regularon limitaciones en las propiedades termofísicas de fachadas y cubiertas, distinguiendo varios valores límites en función de la zona climática (véase Tabla 10).

Elemento	Subcategoría	Transmitancia térmica máxima [W/(m²K)]				
		Zona climática				
		Zonas 1-2	Zonas 3-6		Zonas 7-8	
			$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
Muro	-	2,5	3,7	2,5	-	-
Cubierta	Mínimo	2,3	2,3	1,5	2,3	1,5
	Medio	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0
	Máximo	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5

Tabla 10. Valores máximos de transmitancia térmica de invierno de los elementos opacos de la envolvente de edificios (regulación brasileña). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

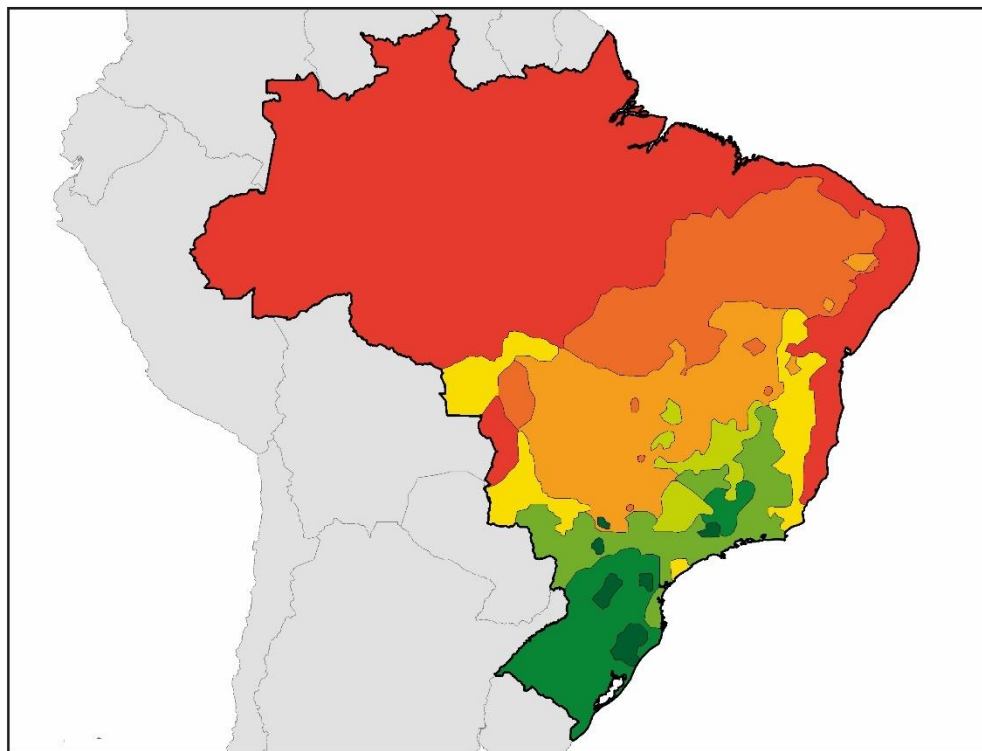


Figura 8. Clasificación climática en Brasil. Fuente: Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019).

La norma hace una distinción en función de la subcategoría de forma similar a la legislación argentina: mínima, media y máxima. Esta clasificación se determina a partir del gradiente térmico mínimo en invierno entre el interior y el exterior y del diferencial de temperatura máxima en verano. De esta manera, la subcategoría que tenga el edificio provocará la variación de la transmitancia térmica de la cubierta.

Asimismo, la absorptividad para muros y techos provocará variaciones en las limitaciones de la transmitancia térmica. Este valor de absorptividad se obtendrá de los valores establecidos en la norma NBR 15220 para los materiales superficiales del cerramiento. Finalmente, cabe señalar que la norma NBR 15575 no define limitaciones para la transmitancia térmica de los muros en las zonas climáticas 7 y 8, ni tampoco existen limitaciones en las propiedades térmicas de las ventanas.

3.1.7. Grado de importancia de la transmitancia térmica en la demanda energética de los edificios

Tal y como se ha visto, existe una gran disparidad en los valores límites asignados a las propiedades térmicas de los edificios. Asimismo, la asignación de estos valores depende de unos criterios de clasificación climática que varían de unos países a otros. Ante esta circunstancia, se plantea, en primer lugar, si la transmitancia térmica constituye una variable significativa en el control energético de los edificios y, en segundo lugar, si la regulación de las propiedades térmicas realizada por cada país presenta características propias ajustadas a cada uno de ellos que garanticen una homogeneidad en el desempeño energético de los edificios de toda la región.

Para ello, se evaluaron 12 modelos de edificios (véase Figura 9) en EnergyPlus. Estos casos de estudio se diseñaron como prototipos experimentales que reproducen los parámetros habituales que se dan en edificios residenciales con geometrías dispares y se basan en los casos de estudio diseñados en otras investigaciones relacionadas con la materia (Rodrigues, Fernandes, Gaspar, Gomes, & Costa, 2019; Rossi & Rocco, 2014). Los modelos se ubicaron en cada una de las zonas climáticas de cada país y las propiedades térmicas de su envolvente se ajustaron a sus reglamentaciones. Asimismo, se empleó un perfil de uso genérico que realizara comparaciones representativas. Para el análisis comparativo se utilizaron las diferentes demandas energéticas de cada caso de estudio (es decir, las demandas energéticas de refrigeración, de calefacción y total).

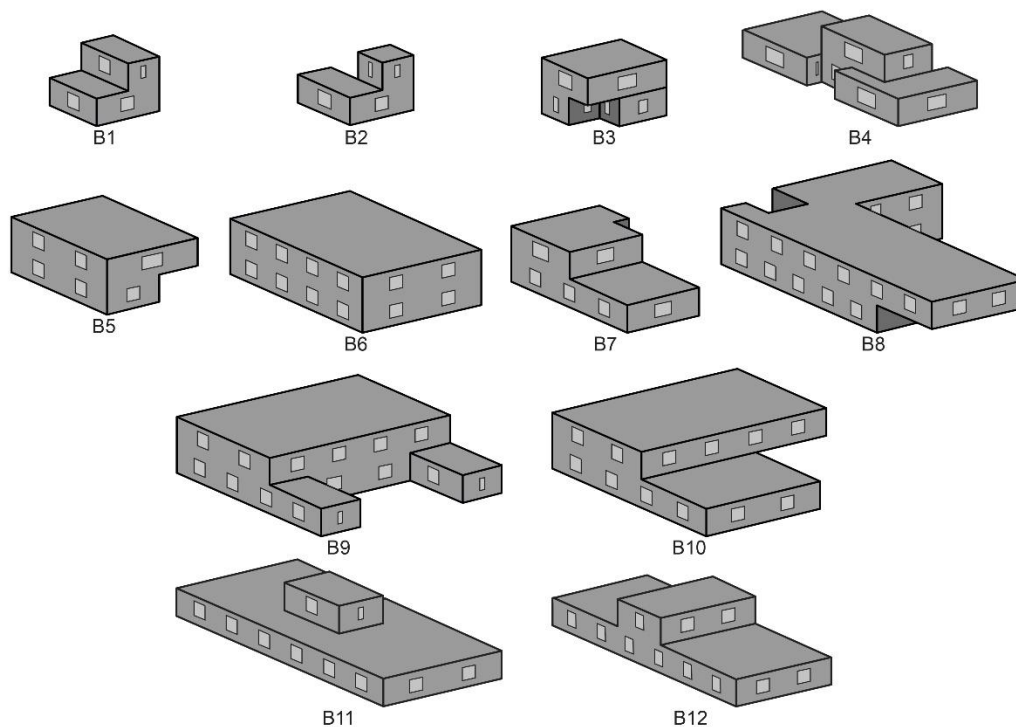


Figura 9. Modelos de edificios diseñados para el análisis comparativo. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Los resultados reflejaron la gran influencia que tiene la transmitancia térmica en la demanda energética de los edificios. Por ejemplo, en el caso de Francia existen dos valores límites que varían las propiedades térmicas de los elementos opacos (véase Figura 10). Esta variación fue muy significativa en la reducción de la demanda energética total, ya que la disminución porcentual fue similar entre las diferentes zonas climáticas, con valores promedios entre 5,34 % y 6,50 %. Sin embargo, los valores de disminución porcentual presentaron una ligera variación

en la zona H3. En este sentido, los valores de disminución porcentual estaban entre 0,25 % y 14,06 %, mientras que en las otras zonas hubo una mayor concentración de estos valores (entre 3,88 % y 7,47 %), debido posiblemente a la diferencia que presentan los nuevos valores límites de la zona H3 en comparación con las otras zonas. Tal y como se ha visto en las Tablas 1 y 3, los valores límites de resistencia térmica en 2023 para la zona H3 a una altitud inferior a 800 m son de 2,2 (m²K)/W en las fachadas. Sin embargo, este valor límite es el mismo que se utiliza en los valores límites actuales, mientras que en las otras zonas se produce un incremento de 0,3 (m²K)/W en el valor límite de resistencia térmica de muros. Esta diferencia puede implicar el cambio de tendencia de disminución porcentual de la zona H3 con las otras zonas.

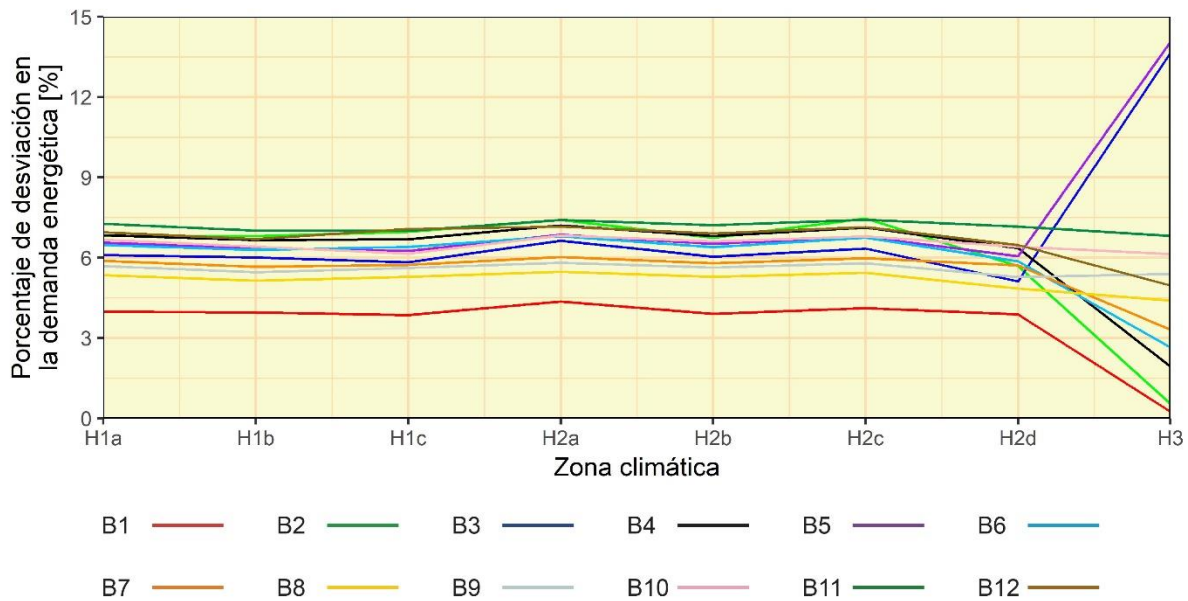


Figura 10. Disminución porcentual en la demanda energética total en los diferentes casos de estudio analizados utilizando los valores límites nuevos para el año 2023 en Francia. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Asimismo, es importante destacar las grandes diferencias encontradas en el comportamiento energético de los casos de estudio en función de la reglamentación de cada país. En este sentido, se detectó un peor rendimiento en aquellos edificios diseñados conforme a las normas de construcción de los países sudamericanos, con especial importancia en el caso de Brasil (véase Figura 11). En la Tabla 10 se incluían las limitaciones de transmitancia térmica para las envolventes de los edificios brasileños. Estos valores límites difieren en gran medida de los incluidos en el resto de las normativas, con unos valores de transmitancia térmica para fachadas que llegan a alcanzar los 3,7 W/(m²K). Como resultado, se puede apreciar en la Figura 11 la gran diferencia existente entre la demanda energética total en algunas zonas de Brasil con el resto de los países. Estas diferencias son bastante acusadas, con un incremento superior a 10.000 kWh/m², lo cual refleja la poca eficiencia del marco regulatorio brasileño y la necesidad urgente de establecer nuevos límites regulatorios que garanticen un desempeño térmico más eficiente de la envolvente de sus edificios, aunque sin olvidar la perspectiva de desarrollo económico que tenga la región. En el caso del resto de países, destaca, por ejemplo, Chile, por presentar unos valores elevados de demanda energética total en algunas de sus zonas climáticas. Además, resulta conveniente señalar la marcada diferencia existente en las tendencias de demanda energética total entre los países sudamericanos y los europeos analizados en este estudio: mientras que los países europeos se caracterizaron por obtener los valores de demanda energética más bajos, en los países sudamericanos se consiguieron

resultados similares únicamente en algunas zonas (p. ej., ND en Chile y IVa en Argentina). Esto refleja que, a pesar de las necesidades de mejora de las reglamentaciones europeas, su amplio desarrollo y actualización en los últimos años (Cornelis, 2019) ha provocado que el ajuste de los parámetros térmicos de la envolvente en las diferentes regiones climáticas sea más elevado que en los países sudamericanos.

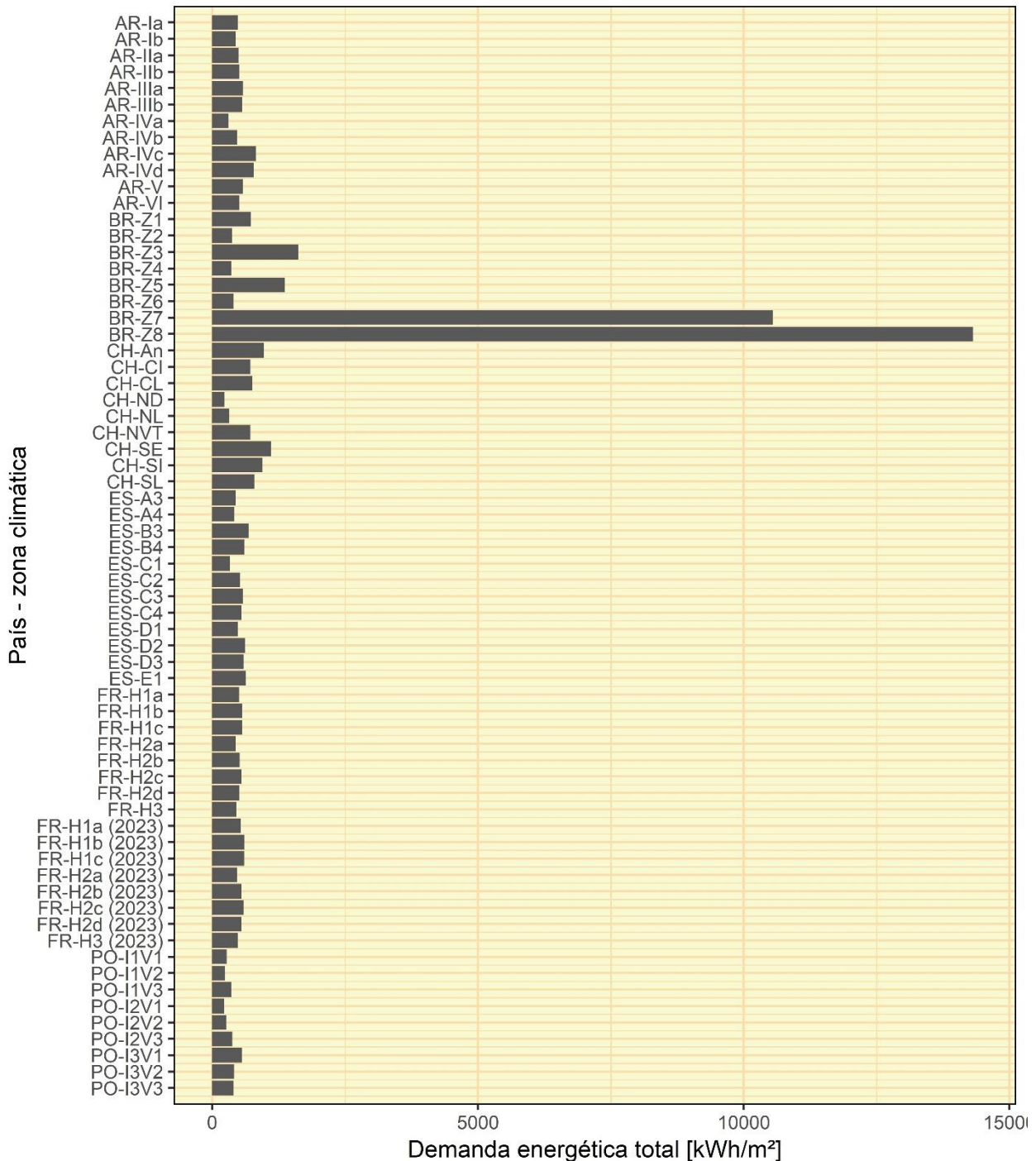


Figura 11. Tendencia lineal de la demanda energética total media de los 12 modelos analizados en las diferentes zonas climáticas y conforme a las limitaciones de cada legislación estatal. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Oliveira, Rubio-Bellido, et al. (2019)).

Así pues, los resultados obtenidos en este estudio contextual destacan el grado de importancia de la transmitancia térmica como variable reguladora del desempeño energético de los

edificios. En este sentido, el desempeño energético de los diferentes casos de estudio varió al cambiar los valores asociados a la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente. Esto no significa que la utilización de los valores más bajos de transmitancia térmica son los que tengan mejores resultados, sino que los valores asociados a las prestaciones térmicas de la envolvente de los edificios deben adaptarse a las condiciones climáticas en las que se encuentren. En cualquier caso, el conocimiento exacto de estas propiedades térmicas es fundamental para que arquitectos, ingenieros, arquitectos técnicos y auditores puedan establecer las medidas de ahorro energético necesarias para mejorar cada edificio. Una variación en el valor de transmitancia térmica asociado a un elemento de la envolvente podría implicar el desarrollo de estrategias energéticas poco eficientes.

3.2. La influencia de las propiedades térmicas de la envolvente en las condiciones de salubridad en el interior de las viviendas⁵

La investigación anterior ha reflejado la importancia que tienen las propiedades térmicas desde el punto de vista energético. Sin embargo, cabe destacar también la influencia que tienen estas propiedades desde la vertiente de salubridad. Por consiguiente, es importante mencionar la estrecha relación que la envolvente presenta con los casos de condensación superficial. Se entiende por condensación superficial cuando la temperatura superficial interior de un elemento es más baja que la temperatura del punto de rocío (Bellia & Minichiello, 2003). Si no se dan unas condiciones de secado adecuadas en estos elementos, el contenido de agua permanece durante grandes períodos de tiempo y favorece el crecimiento de moho (Krus, Rosler, & Sedlbauer, 2006), el cual emite esporas al ambiente interior (Emenius, Egmar, & Wickman, 1998). En este sentido, existen varios estudios que demuestran la correlación existente entre la formación de moho y la aparición de síntomas alérgicos (Holme, Hägerhed-Engman, Mattsson, Sundell, & Bornehag, 2010; Jacob et al., 2002). Esto adquiere mayor relevancia si se tiene en cuenta que los usuarios pasan largos períodos de tiempo en el interior de su vivienda (Schweizer et al., 2007). Así pues, reducir el riesgo de condensación permite asegurar una calidad adecuada del aire interior que evite problemas de salud en sus usuarios (Gładyszewska-Fiedoruk, 2013).

Para establecer un contexto de la necesidad de conocer las propiedades termofísicas de los elementos de la envolvente para garantizar una salubridad adecuada a sus usuarios, se realizó un estudio del riesgo de condensaciones que presentan las fachadas basado en la ISO 13788:2012 (International Organization for Standardization, 2012). Para ello, se seleccionó un caso de estudio representativo de la mayor parte del parque inmobiliario existente en España (véase Figura 12 (a)). Este tipo de edificios presenta un equilibrio inadecuado entre la generación y la eliminación de humedad, por lo que tienen las condiciones adecuadas para que aparezcan problemas de condensación superficial. Las viviendas del caso de estudio tienen 6 habitaciones con varias orientaciones. Para esta investigación, se estudió el caso más desfavorable. Así pues, se analizó el dormitorio orientado hacia el norte (véase Figura 12 (b)), ya que suele ser la orientación con una mayor generación de humedad, sobre todo por la noche (Shin, Rhee, Lee, & Jung, 2018). Se seleccionaron 9 puntos de la fachada (véase Figura 12 (c)): la selección de estos puntos garantizó que la resistencia térmica fuera diferente en cada uno de ellos debido al efecto bidimensional generado por los encuentros entre diversos

⁵ Todo lo reflejado en el subapartado 3.2. corresponde a la siguiente publicación compendiada dentro del marco de esta tesis:

- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Sánchez-García, & D., Moyano, J. (2019). Internal surface condensation risk in façades of Spanish social dwellings. *Building Research and Information*. 47, 1–20, doi:10.1080/09613218.2019.1612729

Esta investigación se realizó en las primeras fases de desarrollo de la tesis con el objetivo de disponer de un conocimiento detallado de la importancia de las propiedades térmicas de la fachada en las condiciones de habitabilidad en el interior de las viviendas.

materiales. Por tanto, las variaciones que presentaran en los riesgos de condensaciones destacarían la importancia que tienen estas propiedades térmicas, con el objeto de mejorar la salubridad de sus ocupantes. Para disponer de una mayor contextualización de este problema, el análisis se llevó a cabo tanto en las condiciones climáticas actuales como en el año 2050. El escenario escogido para el año 2050 es uno de los más desfavorables, el escenario A2, tal y como refleja el informe de 2007 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Este análisis se hizo en cada una de las zonas climáticas de España (véase Figura 5). Para obtener la temperatura superficial del cerramiento, se realizaron simulaciones transitorias (véase Figura 12 (d)). Asimismo, el modelo de simulación se validó mediante una campaña termográfica de cada uno de los puntos (véase Figura 12 (e)).

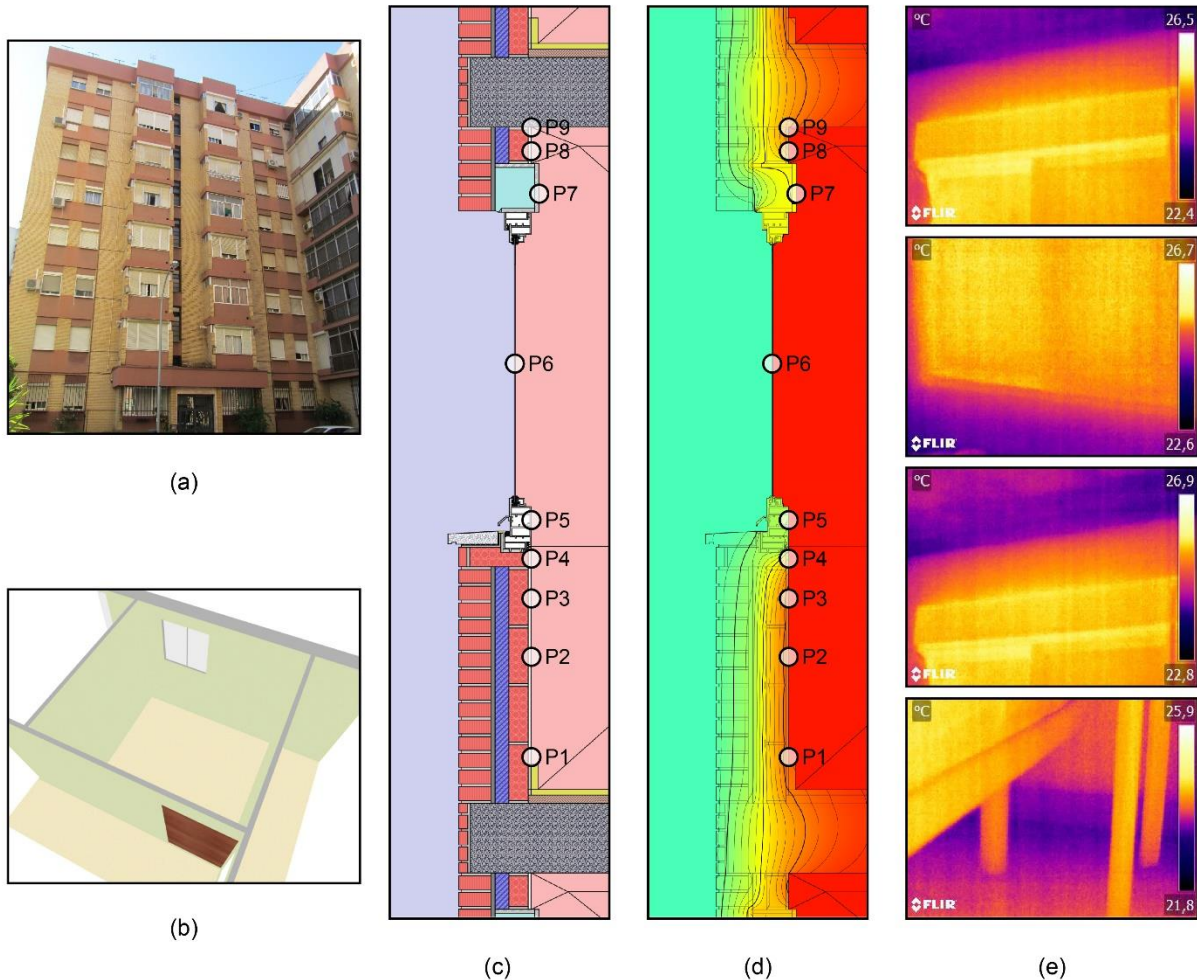


Figura 12. Caso de estudio del análisis de condensaciones: (a) fotografía del edificio; (b) boceto de la habitación analizada; (c) sección y puntos de la fachada analizados; (d) efecto de la bidimensionalidad de la fachada en sus isotermias; y (e) muestra de algunos de los termogramas realizados. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Sánchez-García, et al. (2019)).

Los resultados mostraron la influencia que tienen las propiedades térmicas de la envolvente en la aparición de los problemas de condensación superficial. Esto es debido a la diferencia que la temperatura superficial tiene entre los puntos. Tal y como se puede apreciar en la Figura 13, los puntos de la fachada presentaron variaciones notables en los valores de temperatura superficial interior. Asimismo, la correlación de la temperatura superficial con las temperaturas ambientales variaba en función de su resistencia térmica. En este sentido, los puntos que presentaron una mayor resistencia térmica fueron los que tuvieron una mayor relación con la temperatura interior, mientras que la correlación fue mayor con la temperatura exterior en los puntos que tenían una menor resistencia térmica.

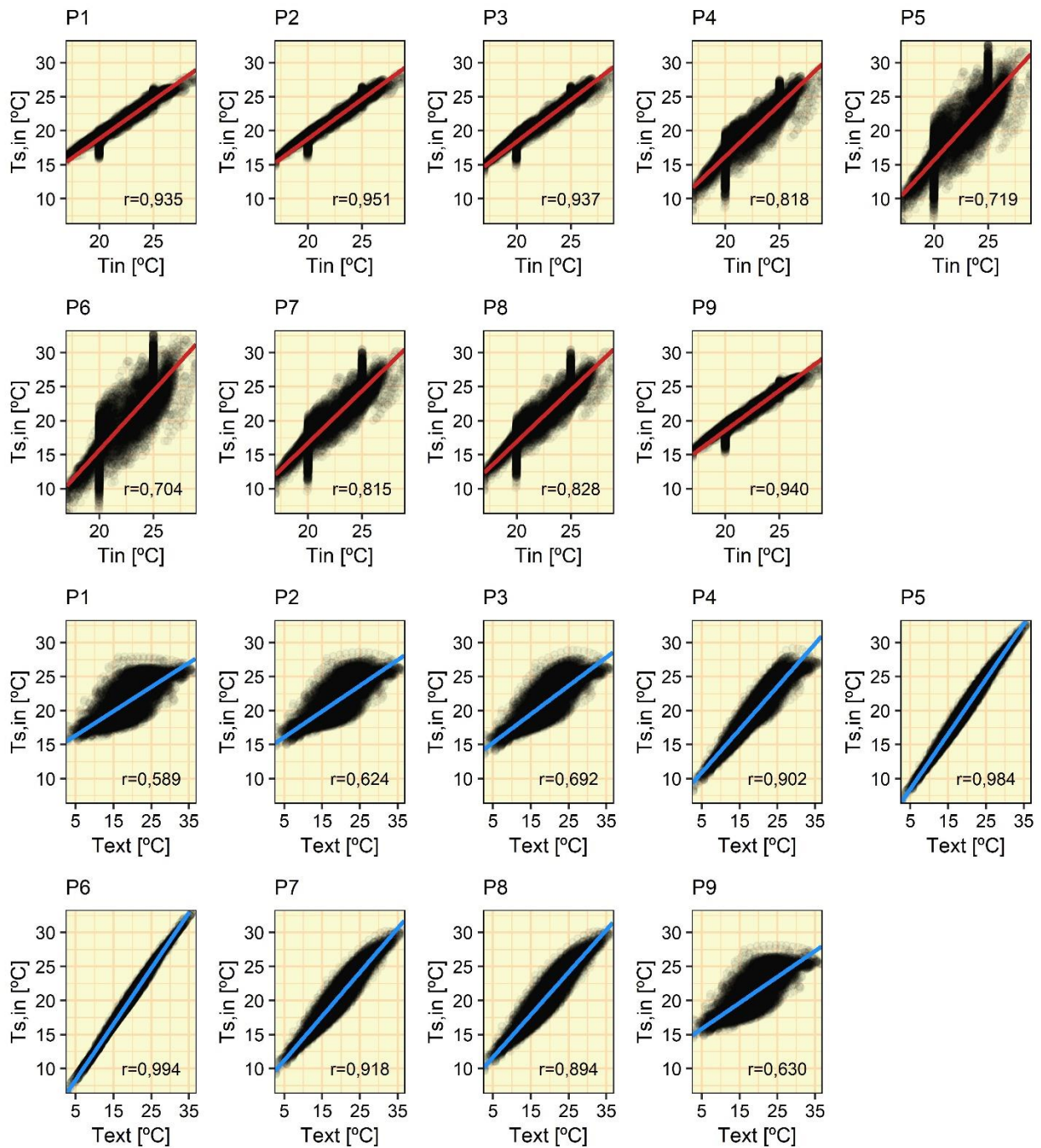


Figura 13. Gráficos de dispersión entre la temperatura superficial interior en los diferentes puntos de la fachada y las temperaturas ambientales. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Sánchez-García, et al. (2019)).

Esta correlación entre la resistencia térmica y las temperaturas ambientales va a tener una repercusión directa en el riesgo de formación de moho. Tal y como se puede apreciar en la Tabla 11, aquellos puntos con una menor resistencia térmica (debido al efecto bidimensional generado por la unión con el marco de la ventana, el cual tiene peores propiedades térmicas) fueron los que tuvieron un mayor número de horas de formación de moho en todas las zonas climáticas de España. En este aspecto, el punto que obtuvo un mayor número de horas fue la unión del muro con el marco de aluminio de la ventana (P4), con un número de horas siempre superior al 60 % en comparación con el siguiente punto con mayor crecimiento de moho (P8). Además, el puente térmico del frente de forjado, aunque no generó un gran incremento en el

número de horas, sí modificó el número de horas de formación de moho con respecto a la sección de cerramiento sin efecto bidimensional. En este sentido, el incremento que presentó el número de horas con riesgo de crecimiento de moho en relación con el muro sin influencia del puente térmico fue inferior al 31,25 % y al 54,05 % para el puente térmico del suelo y del techo, respectivamente.

En cuanto al riesgo de crecimiento de moho en el escenario 2050, se detectaron dos comportamientos diferentes (véase Tabla 12):

- Los puntos con una mayor resistencia térmica (P1, P2, P3 y P9) presentaron disminuciones porcentuales en el número de horas con riesgo de formación de moho de entre un 5,26 % y 94,12 % en todas las zonas climáticas.
- Los puntos con una menor resistencia térmica (P4 y P8) presentaron incrementos porcentuales en el número de horas con riesgo de formación de moho de entre un 3,17 % y 37,01 % en todas las zonas climáticas. Solo en la zona E1 se consiguió una reducción en el número de horas de P4.

Zona climática	Horas por año con riesgo de crecimiento de moho [h/año]					
	P1	P2	P3	P4	P8	P9
A3	251	213	247	1.982	1.191	266
A4	363	318	372	2.363	1.474	379
B3	253	243	283	2.100	1.101	281
B4	201	169	218	1.748	911	221
C1	46	40	55	1.238	500	55
C2	142	120	147	1.626	732	140
C3	48	37	60	1.359	579	57
C4	126	96	115	1.641	680	120
D1	85	77	80	1.178	281	90
D2	39	32	42	1.359	342	40
D3	105	88	90	1.265	331	99
E1	44	34	41	1.229	287	44

Tabla 11. Horas por año con riesgo de crecimiento de moho en el escenario actual. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Sánchez-García, et al. (2019)).

Zona climática	Porcentaje de desviación en el número de horas anuales con riesgo de crecimiento de moho [%]					
	P1	P2	P3	P4	P8	P9
A3	-38,65	-50,23	-39,68	18,92	28,46	-34,96
A4	-40,50	-55,97	-47,04	5,63	18,11	-39,05
B3	-64,82	-74,90	-60,78	8,95	22,71	-62,63
B4	-57,21	-68,05	-59,17	21,85	30,30	-54,75
C1	-19,57	-20,00	-10,91	26,58	21,00	-5,45
C2	-45,07	-49,17	-27,89	8,18	6,01	-29,29
C3	-6,25	-16,22	-33,33	18,18	20,38	-5,26
C4	-65,87	-75,00	-66,09	3,17	9,12	-60,83
D1	-51,76	-50,65	-35,00	14,86	37,01	-41,11
D2	-71,79	-75,00	-73,81	8,68	27,49	-72,50
D3	-66,67	-67,05	-60,00	4,58	7,55	-61,62
E1	-84,09	-94,12	-82,93	-1,14	4,53	-81,82

Tabla 12. Porcentaje de desviación del número de horas anuales con riesgo de crecimiento de moho en el escenario 2050. Los valores negativos corresponden a una disminución porcentual y los valores positivos, a un incremento porcentual. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Sánchez-García, et al. (2019)).

Así pues, los resultados mostraron una relación directa entre la aparición de casos de formación de moho y la resistencia térmica de los elementos de fachada. Por consiguiente, el conocimiento preciso de estas propiedades permitirá tener un mayor control en las condiciones de habitabilidad en el espacio interior de los edificios, aunque se debe controlar junto con una correcta ventilación. En este sentido, en la Tabla 13 se muestra la disminución significativa del número de horas anuales con riesgo de crecimiento de moho, conseguida con una ventilación adecuada conforme al Código Técnico de la Edificación. Incluso en estos casos, los puntos con una menor resistencia térmica siguen presentando un cierto número de horas de formación de moho. Por lo tanto, estos resultados reflejan la importancia que tiene el conocimiento exacto de las prestaciones térmicas de los edificios para las actuaciones de eliminación de condensaciones superficiales en edificios que presentan graves patologías o para los posibles problemas respiratorios que puedan presentar los usuarios de las viviendas.

Zona climática	Número de horas anuales con riesgo de crecimiento de moho [h/año]											
	Actual						2050					
	P1	P2	P3	P4	P8	P9	P1	P2	P3	P4	P8	P9
A3	2	2	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
A4	2	2	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
B4	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
C4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
D1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
D2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
E1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 13. Horas por año con riesgo de crecimiento de moho en el supuesto de incorporar un sistema de ventilación (escenario actual y 2050). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Sánchez-García, et al. (2019)).

3.3. La relevancia de la transmitancia térmica

Los resultados de los estudios anteriores, realizados en el marco de esta tesis, reflejan el grado de importancia que tienen las propiedades térmicas de la envolvente de los edificios, tanto desde la vertiente de energía como desde la vertiente de salubridad. Asimismo, se ha comprobado que la variación de los valores térmicos de la envolvente tiene consecuencias directas en el rendimiento energético del edificio y en la mejora o empeoramiento de las condiciones de los espacios interiores.

En este sentido, el parque de edificios existentes se caracteriza por disponer de un rendimiento térmico pobre en sus envolventes (Kurtz et al., 2015). A su vez, esto adquiere una mayor relevancia en las fachadas, ya que son el elemento de mayor superficie en contacto con el aire exterior (Adhikari, Lucchi, & Pracchi, 2012) y que, por tanto, son por donde tienen lugar las mayores pérdidas energéticas. Así pues, la mayor parte del parque inmobiliario se caracteriza por disponer de un elevado consumo energético y por unas condiciones interiores con una alta probabilidad de no ser las ideales durante la mayor parte del año.

El comportamiento térmico de estas fachadas es deficiente debido a su diseño y al envejecimiento de los materiales (Waddicor et al., 2016). Se estima que la mejora del rendimiento térmico de las fachadas permitiría reducir entre un 10 % y un 45 % las pérdidas de calor de los edificios (Walker & Pavía, 2015). Como consecuencia, la disminución de estas

pérdidas de calor reduciría el consumo energético, tal y como se ha visto en los resultados obtenidos en el estudio comparativo de las regulaciones de los diferentes países.

En resumen, determinar correctamente la transmitancia térmica resulta fundamental para no sobreestimar el consumo energético. Además, la obtención de un valor erróneo de transmitancia térmica de un cerramiento influye en el cálculo de otros aspectos relacionados con la rehabilitación energética (p. ej., el rango de horas de confort térmico), lo que puede implicar la propuesta de medidas poco adaptadas a la realidad, con un incremento en los periodos de amortización económica.

Así pues, arquitectos, ingenieros, arquitectos técnicos y el resto de los profesionales encargados de los trabajos de la mejora energética del parque inmobiliario existente deben caracterizar correctamente la transmitancia térmica con el objeto de reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂ en consonancia con los nuevos objetivos y prioridades de la sociedad del siglo XXI. Esta propiedad se puede determinar a través de diferentes procedimientos, tales como los métodos de cálculo teórico o los ensayos *in situ*. En el Apartado 4 se revisan de manera exhaustiva las investigaciones existentes acerca de la caracterización de la transmitancia térmica, de manera que se reflejan las brechas de conocimiento relacionadas con dichas metodologías.

4. Estado del arte⁶

4.1. Métodos de caracterización de la transmitancia térmica

La caracterización de la transmitancia térmica de cerramientos puede realizarse a través de diferentes procedimientos teóricos y experimentales. Los principales procedimientos que disponen de un mayor desarrollo y aplicación tanto a nivel científico como profesional vienen reflejados en la Figura 14. En los próximos subapartados se hace una descripción detallada de cada uno de ellos.

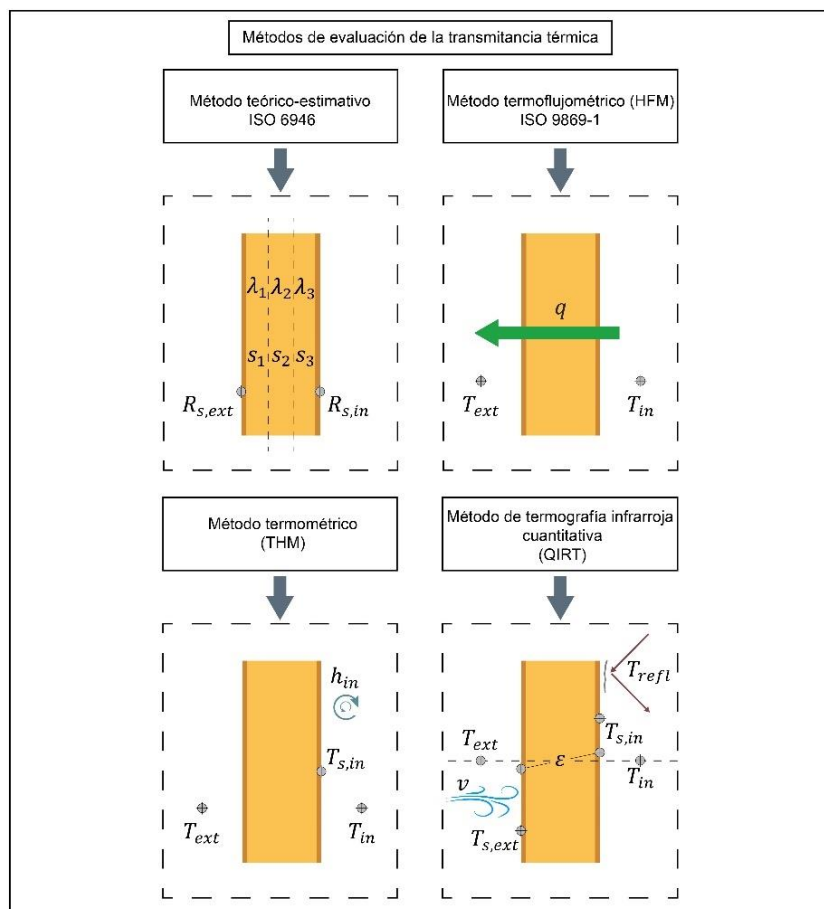


Figura 14. Esquema de los diferentes métodos de determinación de la transmitancia térmica. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

⁶ Todo lo reflejado en el Apartado 4. corresponde a la siguiente publicación compendiada dentro del marco de esta tesis:

- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Marín, D., & Fresco-Contreras, R. (2019). Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 102, 356–371. doi:10.1016/j.rser.2018.12.016

Esta investigación se realizó en las primeras fases de desarrollo de esta tesis con el objetivo de disponer de una revisión detallada de la literatura científica a través de la cual se plantearon las principales brechas de conocimiento existentes en los métodos experimentales. El lector puede encontrar que, en el artículo publicado, existen investigaciones desarrolladas dentro del marco de esta tesis (como las concernientes al método termométrico), debido al proceso de revisión que sufrió la publicación a raíz de las sugerencias de los revisores, las cuales provocaron la modificación del cuerpo original del artículo desarrollado.

4.2. Método teórico-estimativo

El método de la norma ISO 6946:2007 (International Organization for Standardization, 2007b) es el procedimiento teórico-estimativo para calcular la transmitancia térmica de un cerramiento convencional a través del espesor y la conductividad térmica de cada una de sus capas, así como las resistencias térmicas superficiales interior y exterior del cerramiento mediante la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{R_{s,in} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + R_{s,ext}} \quad (1)$$

Donde λ_i [W/(m·K)] y s_i [m] son la conductividad térmica y el espesor de cada una de las capas del cerramiento, respectivamente, y $R_{s,in}$ y $R_{s,ext}$ [(m²·K)/W] son las resistencias superficiales interior y exterior, respectivamente. Estas resistencias térmicas superficiales se obtienen a través de valores tabulados en la norma ISO 6946:2007 que se derivan de condiciones de frontera precisas en términos de transferencia de calor por convección y radiación. Para el caso de fachadas, los valores son 0,13 para $R_{s,in}$ y 0,04 para $R_{s,ext}$.

Se trata de un método ampliamente empleado en la literatura científica (véase Tabla 14). El método presenta como principales ventajas que se trata de un procedimiento de cálculo simple y que no necesita realizar ensayos para determinar la transmitancia térmica, por lo que se utiliza de manera considerable en la fase de diseño y como metodología de justificación en la reglamentación energética de diferentes países (Rodríguez-Soria et al., 2014). Sin embargo, presenta un nivel de incertidumbre elevado, ya que, en la mayoría de los casos, se desconoce tanto la composición del cerramiento como los valores de conductividad térmica de cada una de sus capas (Ficco et al., 2015). La composición del cerramiento se puede determinar mediante diversas técnicas, tales como:

- El análisis endoscópico (Desogus et al., 2011; Echarri, Espinosa, & Rizo, 2017; Ficco et al., 2015).
- El uso de documentación técnica fiable, tales como el proyecto del edificio o las bases de datos de estudios de catalogación de edificios mediante los cuales se puedan determinar el número, el tipo y las características de las capas del muro (Ballarini, Corgnati, & Corrado, 2014).
- La estimación por construcciones análogas o por la experiencia profesional (Ballarini et al., 2014; Ficco et al., 2015).

Así pues, existen técnicas destructivas y no destructivas para determinar la composición del muro. De las tres técnicas, la que menor fiabilidad ofrece es la estimación por construcciones análogas, debido a la falta de precisión en el espesor y en las propiedades termofísicas de los materiales (Asdrubali, D'Alessandro, Baldinelli, & Bianchi, 2014; Ficco et al., 2015). Por consiguiente, las técnicas más eficaces son la endoscopia y el uso de documentación técnica, ya que introducen una menor incertidumbre en la estimación del tipo y de las propiedades de las capas del elemento analizado (Ficco et al., 2015). Además, el análisis endoscópico determina otras características del muro, como por ejemplo el contenido de humedad que presenta (Lucchi, 2017a), aunque los desperfectos que generan pueden limitar su utilización en casos reales.

Temática	Comentario	Referencias
Aplicación del método en diferentes casos de estudio o comparación con métodos experimentales	Investigaciones de aplicación del método teórico-estimativo en diversos casos de estudio. Asimismo, se incluyen aquellos estudios que utilizaron el método teórico para validar los resultados obtenidos a través de los métodos experimentales	<ul style="list-style-type: none"> - Adhikari et al. (2012) - Asdrubali et al. (2014) - Atsonios et al. (2017, 2018) - Baker (2011) - Ballarini et al. (2014) - Choi y Ko (2017) - Dall'O' et al. (2013) - Desogus et al. (2011) - Echarri et al. (2017) - Elwell et al. (2017) - Evangelisti et al. (2015) - Ficco et al. (2015)
Limitaciones del método e influencia de los factores ambientales	Investigaciones de análisis de las limitaciones del método y estudio de la influencia de los factores ambientales sobre las propiedades termofísicas de los materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Baker (2011) - Byrne et al. (2013) - Budaiwi y Abdou (2013) - Domínguez-Muñoz et al. (2010) - Ficco et al. (2015) - Gomes et al. (2017) - Khoukhi (2018)
Desarrollo del método	Investigaciones de propuesta, de aplicación y de estudio de nuevas técnicas para la obtención de resultados con el método, así como de la estimación de la incertidumbre	<ul style="list-style-type: none"> - Ballarini et al. (2014) - Desogus et al. (2011) - Ficco et al. (2015) - Pérez-Bella et al. (2015; 2017)

Tabla 14. Resumen de los trabajos de investigación del método teórico-estimativo. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

En la mayoría de las bases de datos de materiales de construcción, los valores de conductividad térmica pueden oscilar entre un valor mínimo y un valor máximo en función de su densidad. Esta característica se suele dar en los materiales aislantes, cuyos valores de resistencia térmica son los que más contribuyen en el resultado de transmitancia térmica obtenido a través de la Ecuación (1). No obstante, los límites que presentan estos materiales pueden derivar en la obtención de valores diferentes de transmitancia térmica. Una forma de calcular la transmitancia térmica para estos casos es mediante el criterio establecido por Ficco et al. (2015): realizar un promedio de los valores máximo ($U_{i,max}$) y mínimo ($U_{i,min}$) asociados al cerramiento en función de los extremos de la distribución de los valores de conductividad térmica posibles para cada una de sus capas (véase Ecuación (2)).

$$U = \frac{U_{i,max} + U_{i,min}}{2} \quad (2)$$

Además, un método de estimación de la incertidumbre para el método de la ISO 6946:2007 fue elaborado por Ficco et al. (2015), con contribuciones para el espesor y para la conductividad térmica de las capas. Para esta última consideró una distribución rectangular con el límite superior ($\lambda_{i,max}$) y el límite inferior ($\lambda_{i,min}$), por lo que la estimación de la incertidumbre viene dada por la Ecuación (3). En el caso de caracterizar las capas mediante una endoscopia, planteó una incertidumbre relativa del 3 % para la conductividad térmica. Además, planteó una contribución para el espesor de cada una de las capas, ya que puede haber diferencias entre

los datos de diseño y los reales o la precisión del instrumento de medición utilizado (p. ej., un calibre).

$$u(\lambda_i) = \frac{\lambda_{i,max} - \lambda_{i,min}}{\sqrt{12}} \quad (3)$$

Sin embargo, cuando no se dispone de información técnica o no se puede practicar una endoscopia, la determinación de la configuración del cerramiento supone todo un reto y afecta tanto a cerramientos complejos como a simples (Evangelisti et al., 2015). Para estos casos, las principales dificultades asociadas a la correcta identificación del cerramiento son:

- Estratigrafía de la fachada.
- Heterogeneidades térmicas (p. ej., puentes térmicos).
- Presencia de humedad.
- Envejecimiento de los materiales y deterioro de sus propiedades térmicas.
- Variaciones en el valor de conductividad térmica real con respecto al valor estimado debido a las condiciones ambientales.

Para el caso de las variaciones por las condiciones ambientales, uno de los motivos que provoca esta circunstancia es que los valores de conductividad térmica varían en función de la temperatura y de la humedad ambiental (Budaiwi & Abdou, 2013; Domínguez-Muñoz et al., 2010; Gnip, Véljélis, & Vaitkus, 2012; Lucchi, 2017a; Ochs et al., 2008). En este sentido, en la mayoría de bases de datos existentes, como por ejemplo el Catálogo de Elementos Constructivos en España (vinculado al Código Técnico de la Edificación), se utilizan unos valores ambientales fijos para calcular las propiedades térmicas de los materiales según la ISO 10456:2007 (International Organization for Standardization, 2007a).

Sin embargo, esta forma de actuar provoca que no se tengan en cuenta las variaciones que tendrán los valores de conductividad térmica en diferentes regiones climáticas. Ante esta situación, las investigaciones realizadas por las Universidades de Oviedo y de Zaragoza (Pérez-Bella, Domínguez-Hernández, Cano-Suñén, Alonso-Martínez, et al. (2015) y Pérez-Bella, Domínguez-Hernández, Cano-Suñén, Del Coz-Díaz, et al. (2015; 2017)) establecieron un procedimiento simplificado de aplicación de la ISO 10456:2007 mediante la aplicación de unos factores de corrección de la conductividad térmica (CCF) obtenidos para cada una de las capitales de provincia en España en función de las condiciones ambientales exteriores (véase Figura 15).

Estos factores simplifican la aplicación de la ISO 10456:2007 combinando un factor de conversión de temperatura y otro de humedad (véase Ecuación (4)), los cuales se aplican a la conductividad térmica del material (véase Ecuación (5)), por lo que su utilización permite modificar la transmitancia térmica obtenida a través de la Ecuación (1).

$$CCF = F_{Tcorreccion} \cdot F_{Hcorreccion} \quad (4)$$

$$\lambda_{CCF} = \lambda \cdot CCF \quad (5)$$

Donde CCF [adimensional] es el factor de corrección de la conductividad térmica, $F_{Tcorreccion}$ [adimensional] es el factor de corrección de temperatura, $F_{Hcorreccion}$ [adimensional] es el factor de corrección de humedad y λ_{CCF} [(m²·K)/W] es la conductividad térmica del material aplicando la corrección del CCF.

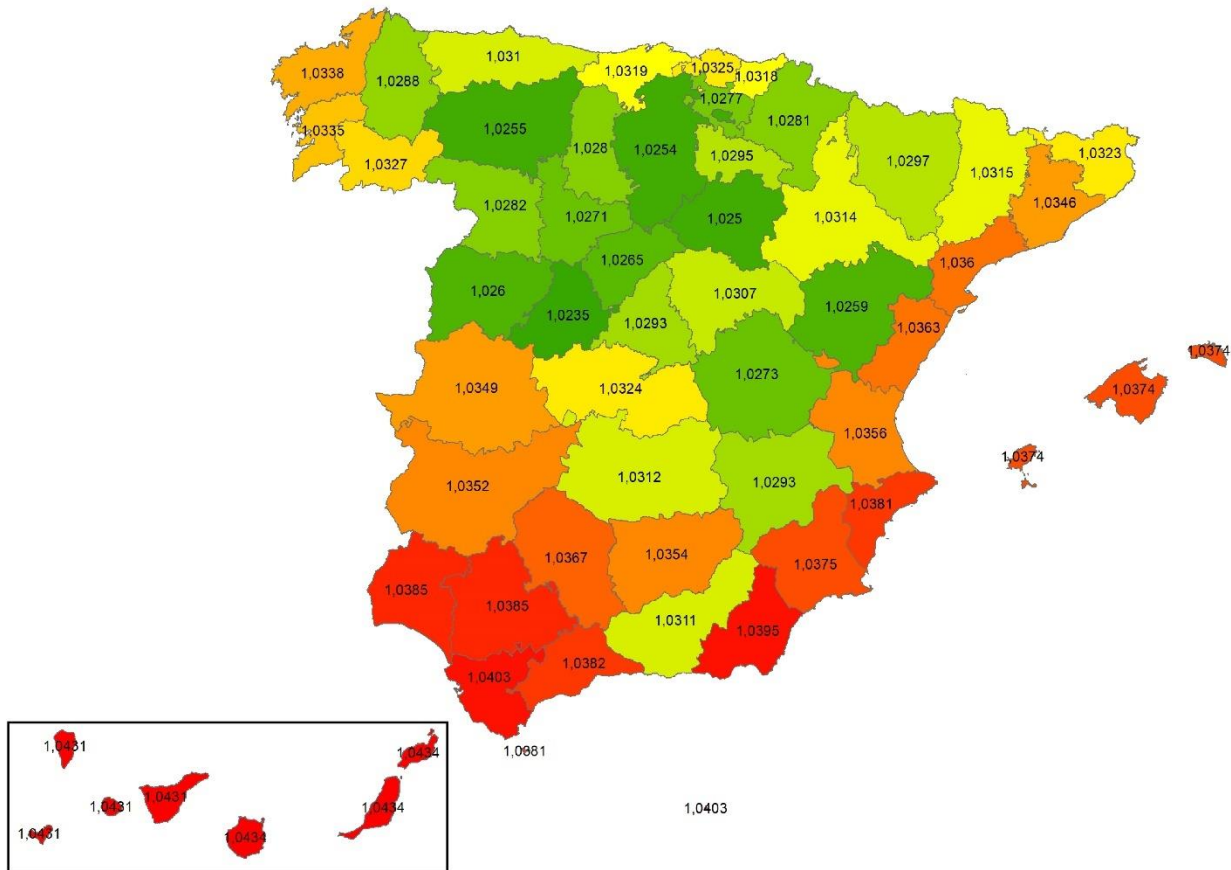


Figura 15. Mapa con los coeficientes de ponderación CCF para el cálculo teórico. Fuente: propia, elaborada a partir de los datos de Pérez-Bella et al. (2015).

A pesar de esto, tal y como se ha indicado anteriormente, se trata de un método muy empleado en la fase de diseño y como justificación del cumplimiento de la normativa estatal en materia de eficiencia energética en muchos países (Rodríguez-Soria et al., 2014). Además, también se utiliza para validar los resultados de los métodos experimentales gracias a uno de los criterios de interpretación de los datos incluido en la ISO 9869-1:2014 (véase Ecuación (6)). En el apartado 7.3 de esta norma se indica que los resultados experimentales son representativos cuando existe una diferencia inferior al 20 % entre el valor medido y el estimado, siempre que este último se obtenga de manera precisa.

$$\sigma = \frac{U_{9869-1} - U_{6946}}{U_{6946}} \quad (6)$$

Donde U_{6946} [W/(m²·K)] es la transmitancia térmica obtenida a través de la ISO 6946:2007 y U_{9869-1} [W/(m²·K)] es la transmitancia térmica obtenida a través del método termoflujométrico de la ISO 9869-1:2014 (aunque venga indicado en la ISO 9869-1:2014, este criterio también ha sido usado en otros métodos, como por ejemplo el cuantitativo mediante termografía infrarroja (Fokaides & Kalogirou, 2011; Tejedor et al., 2017)).

En este sentido, el desconocimiento de las propiedades termofísicas del muro puede dar lugar a desviaciones superiores al 30 % (P. Baker, 2011; Byrne et al., 2013; Evangelisti et al., 2015; Rye & Scott, 2012), aunque también pueden deberse a otros factores, tales como la presencia de puentes térmicos, las heterogeneidades de la fachada, el envejecimiento de los materiales o la presencia de humedad (Gomes et al., 2017; Litti et al., 2015; Lucchi, 2017b, 2017a; Ochs et al., 2006). Esta circunstancia puede darse principalmente en edificios históricos. En las campañas realizadas por Lucchi (2017a, 2017b) sobre edificios históricos de mampostería, se

concluyó que el valor determinado a través de la ISO 6946:2007 sobreestimaba el valor de transmitancia térmica con respecto al obtenido a través de los métodos experimentales.

Así pues, la utilización de los métodos experimentales reduce los errores asociados al método teórico-estimativo. Sin embargo, el método aportará resultados representativos siempre que la determinación del número y de las propiedades térmicas de cada capa del elemento se realice de manera precisa y siempre que el muro analizado presente un estado adecuado, esto es, sin puentes térmicos ni presencia de humedad.

4.3. Método termoflujométrico (HFM)

Respecto a los métodos experimentales, el método termoflujométrico (en inglés, *heat flow meter method* (HFM)) es, hasta la fecha, el único que se encuentra estandarizado a través de la ISO 9869-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014). Además, es el método de evaluación de la transmitancia térmica que tiene un mayor número de investigaciones en los últimos años (veáse Tabla 15). El método consiste en la obtención del valor de transmitancia térmica mediante la medición del flujo de calor que atraviesa un determinado cerramiento y las temperaturas de los ambientes que el elemento separa.

Se trata, pues, de un método no destructivo cuyas desventajas *a priori* pueden ser la necesidad de acceder al interior de la vivienda, las limitaciones que presenta el mobiliario existente al colocar las sondas y la influencia que pueda tener el comportamiento de los inquilinos durante la medición (P. Baker, 2011; Birchall, Pearson, & Brown, 2011; Meng et al., 2015). Los equipos necesarios para realizar el ensayo son:

- Una placa medidora de flujo de calor, la cual es un transductor con sensores de temperatura que generan una señal eléctrica en función del flujo de calor que se transmite a través de ella.
- Dos sondas de temperatura de aire, tales como termopares o termistores, de alta precisión (entre $\pm 0,1$ °C y $\pm 0,2$ °C) (Gaspar et al., 2018).
- Un gestor de datos para la conexión de las sondas y el almacenamiento de los datos.
- Para algunos métodos de análisis dinámico resulta necesario medir las temperaturas superficiales interior y exterior del muro.

Estos equipos deben estar calibrados en el momento de realizar el ensayo, aunque existen dificultades para encontrar servicios de calibración acreditados para la placa medidora de flujo de calor (Arpino, Dell'Isola, Ficco, Iacomini, & Fernicola, 2011). Otros equipos que se pueden emplear durante los ensayos son: una estación meteorológica para el control de las condiciones ambientales y una cámara termográfica para la valoración cualitativa a través de la ASTM C1060 (ASTM International, 2015) o de la ISO 6781:1983 (International Organization for Standardization, 1983) para la adecuada colocación de la placa medidora de flujo de calor (Ascione, Bianco, De Masi, De'Rossi, & Vanoli, 2013; Ascione et al., 2014; P. Baker, 2011; Ficco et al., 2015). Estos equipos opcionales permitirán asegurar que el ensayo se realice con unas condiciones ambientales adecuadas, así como que el cerramiento tenga un estado de conservación aceptable.

Temática	Comentario	Referencias
Aplicación del HFM en diferentes casos de estudio	Investigaciones de aplicación práctica del HFM en diversos casos de estudio, como viviendas desocupadas o edificios históricos	- Adhikari et al. (2012) - Asdrubali et al. (2014) - Atsonios et al. (2017, 2018) - Baker (2011) - Choi y Ko (2017) - Elwell et al. (2017) - Ficco et al. (2015)
		- Gaspar et al. (2018) - Li et al. (2014) - Litti et al. (2015) - Lucchi (2017a, 2017b) - McIntyre (1985) - Rye y Scott (2012)
Limitaciones metrológicas y operacionales	Investigaciones de análisis de las limitaciones metrológicas asociadas a la utilización de las sondas (principalmente, la placa medidora de flujo de calor) y de las perturbaciones que genera en el comportamiento térmico del elemento	- Arpino et al. (2011) - Cesaratto et al. (2011) - Cucumo et al. (2006, 2018) - Desogus et al. (2011) - Ficco et al. (2015) - Gaspar et al. (2018) - Guattari et al. (2017) - Meng et al. (2015) - Peng y Wu (2008)
		- Trethowen (1986) - Zalewski et al. (2010)
Influencia de los factores ambientales	Investigaciones de análisis de la influencia de los factores ambientales, tales como el gradiente térmico o la velocidad del viento, sobre la representatividad de los resultados	- Ahmad et al. (2014) - Albatici y Tonelli (2010) - Desogus et al. (2011) - Evangelisti et al. (2018) - Ficco et al. (2015) - Genova y Fatta (2018) - Gori y Elwell (2018) - Litti et al. (2015)
		- Wang et al. (2010)
Procesado y análisis de los datos	Investigaciones de propuesta, de aplicación y de estudio de métodos de análisis de los datos para las dos tipologías de métodos del HFM (métodos estáticos y dinámicos)	- Ahvenainen et al. (1980) - Aittomäki (1972) - Anderlind (1992, 1996) - Al-Sanea et al. (2012) - Baker y van Dijk (2008) - Biddulph et al. (2014) - Cesaratto y Carli (2011) - Deconinck y Roels (2016) - Gaspar et al. (2016) - Gori et al. (2017)
		- Gutschker (2004, 2008) - Jiménez et al. (2009) - Juhl et al. (2013) - Kupke (1976) - Madsen et al. (2015) - Naveros et al. (2014, 2015) - Norlén (1990, 1994) - Roulet et al. (1985) - Van Dijk et al. (1994) - Wang et al. (2010)

Tabla 15. Resumen de los trabajos de investigación del HFM. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

La colocación de las sondas es un aspecto esencial para garantizar la correcta ejecución de los ensayos. Los criterios básicos para su colocación (véase Figura 16) son los siguientes:

- La placa medidora de flujo de calor se debe colocar a una altura de 1,5 m sobre el nivel del suelo (Albatici, Tonelli, & Chiogna, 2015) y se ubica, por lo general, entre las ventanas y las esquinas para evitar la influencia de puentes térmicos (Adhikari et al., 2012; Rye & Scott, 2012; Zalewski et al., 2010).
- Para cerramientos con equipos de climatización, como *fan-coils* y radiadores, la placa medidora de flujo de calor se debe colocar a una distancia, como mínimo, de 1,3 m del equipo para evitar distorsiones en las medidas (Guattari et al., 2017).

- Algunos autores recomiendan la colocación de la placa medidora de flujo de calor interponiendo una fina capa de grasa silicona o un material con una alta conductividad térmica (p. ej., la pasta térmica utilizada en el montaje de procesadores) para garantizar un contacto adecuado con el cerramiento, así como la colocación de una fina lámina de PVC para proteger la superficie de la pared de posibles manchas (Biddulph et al., 2014; Elwell et al., 2017; Gori et al., 2017).
- Peng y Wu (2008) recomendaron que la placa medidora de flujo de calor debe estar enlucida o incrustada en la superficie para evitar distorsiones en las medidas.
- Las sondas de temperatura de aire interior y exterior se deben colocar a una distancia entre 30 cm y 40 cm del cerramiento para evitar efectos convectivos (Andújar Márquez, Martínez Bohórquez, & Gómez Melgar, 2017). Dado que en el interior de las viviendas suele haber un gradiente térmico entre el piso y el techo que hace que la temperatura ambiente no sea la misma a diferentes alturas (Andújar Márquez et al., 2017), aquellos equipos que midan directamente temperaturas de aire se deben colocar a una distancia de 20 cm en vertical con el resto de sondas (TESTO AG, 2014). El uso de una estructura auxiliar puede ser útil para colocar la sonda exterior a la distancia recomendada (Echarri et al., 2017).

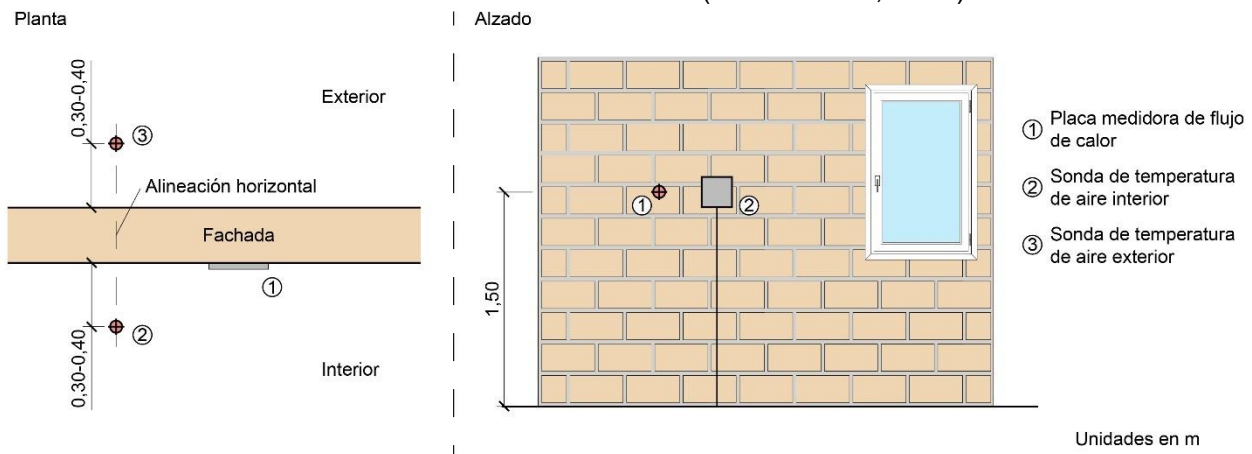


Figura 16. Criterios de colocación de las sondas de medición en el HFM. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

4.3.1. HFM: Requisitos metroológicos y condiciones de ensayo

El HFM es uno de los métodos de caracterización de la transmitancia térmica con un mayor desarrollo en el campo de la investigación científica. En este sentido, numerosos estudios han analizado la caracterización térmica de distintas tipologías de cerramientos: (i) Lucchi (2017a) evaluó 14 cerramientos históricos de ladrillo con el método de la ISO 9869-1:2014. Los resultados reflejaron desviaciones entre los valores medidos y los valores tabulados y calculados según la normativa italiana, de manera que se mostró la sobreestimación que se puede realizar con los procedimientos teóricos, sobre todo en edificios antiguos; (ii) en otro estudio posterior, Lucchi (2017b) llevó a cabo una campaña experimental en una muestra de 10 cerramientos históricos de piedra. Nuevamente, hubo desviaciones entre los valores medidos y los obtenidos por los procedimientos tabulados; (iii) esta desviación asociada a los valores tabulados con respecto a los valores medidos con la ISO 9869-1:2014 también fue reflejada por Rotilio et al. (2018). En su estudio, los autores monitorizaron 4 muros de mampostería y obtuvieron desviaciones entre un 10 % y un 15 % entre el valor medido y el establecido por la reglamentación de la zona. Asimismo, los autores detectaron limitaciones para ejecutar los ensayos en muros dañados (p. ej., a causa de terremotos); (iv) Asdrubali et al. (2014) analizaron 6 muros diseñados siguiendo los principios de la bioarquitectura. Los

resultados reflejaron desviaciones con los valores de referencia de entre un 4 % y un 75 %, los cuales pueden deberse a factores tales como la sobreestimación de los valores de conductividad térmica o a los factores ambientales durante la realización del ensayo; y (v) Ficco et al. (2015) analizaron la efectividad del método en 7 elementos verticales de materiales diferentes (entre los que se incluyó un vidrio doble con cámara de aire) y empleando 3 placas medidoras de flujo de calor. Como resultado, se obtuvo un grado de ajuste adecuado en todos los casos de estudio y con las 3 sondas utilizadas.

A pesar de que el uso del HFM permite obtener resultados ajustados, se pueden destacar una serie de investigaciones con relación al HFM que evidencian los problemas metrológicos y operacionales relacionados con la realización del ensayo. Uno de los aspectos más significativos se encuentra en la influencia que tiene la placa del termoflujómetro en el comportamiento térmico del cerramiento. De acuerdo con esto, Cesaratto et al. (2011), Desogus et al. (2011) y Trethewen (1986) establecieron que la presencia de la placa puede provocar una perturbación en el flujo de calor e influir, por tanto, en el resultado de la medición. Otro aspecto importante que destacar es el error asociado al uso de la placa. En este sentido, Peng y Wu (2008) demostraron que la principal contribución al error en los resultados de transmitancia térmica se debe al flujo de calor. Estas conclusiones coincidían con lo ya indicado por Cucumo et al. (2006), quienes destacaron la influencia significativa que tiene la ubicación de la placa para una medición correcta del flujo de calor. En un estudio posterior, estos autores determinaron que las variaciones del flujo de calor pueden ser de hasta un 30 % (Mario Cucumo et al., 2018). Este valor de error porcentual está en consonancia con los resultados obtenidos por Meng et al. (2015), en cuyo estudio concluyeron que el error máximo en la determinación de la transmitancia térmica debido a la colocación de la placa puede ser de hasta un 26 % y destacaron que, cuanto mayor es el tamaño de la placa medidora de flujo de calor, menor es el error asociado a la colocación de esta.

A pesar de esto, la utilización de la placa no es la única contribución de error en la realización del ensayo. En este sentido, Ficco et al. (2015) expusieron una relación exhaustiva de diferentes contribuciones de incertidumbre, la cuantificación de su error y las posibles medidas para solucionarlas. Algunas de estas contribuciones son: (i) mal contacto entre la placa y el muro, con contribuciones de entre un 2 % y un 5 % que pueden solventarse mediante la colocación de un material intermedio; y (ii) la medición de un flujo no unidimensional, con una incertidumbre de entre un 1 % y un 5 % que puede prevenirse mediante las técnicas de valoración cualitativa empleando termografía infrarroja o repitiendo el ensayo en varias posiciones.

Con respecto a los factores ambientales, la exigencia de un gradiente de temperatura elevado resulta necesaria para obtener resultados representativos. Desogus et al. (2011) obtuvieron una incertidumbre del 10 % para una diferencia de temperatura de 10 °C entre el interior y el exterior, con una incertidumbre menor cuanto mayor era el gradiente térmico. Otros autores, tales como Albatici y Tonelli (2010), Ficco et al. (2015) y Gori y Elwell (2018), ratificaron la necesidad de tener un gradiente térmico elevado. Sin embargo, garantizar este gradiente térmico es complicado, sobre todo en elementos con una transmitancia térmica baja en los que la diferencia de temperaturas debe ser superior a 19 °C (Gaspar et al., 2018), circunstancia de difícil cumplimiento en regiones climáticas cálidas. Además, es necesario garantizar una estabilidad de dicho gradiente a lo largo del ensayo sin que el gradiente térmico presente fluctuaciones. En esta línea, Genova y Fatta (2018) determinaron que los ensayos realizados en verano no proporcionaron resultados fiables en comparación con los de invierno en regiones cálidas, debido a las inversiones de flujo de calor y a las oscilaciones en el gradiente térmico.

La influencia de otros factores ambientales, como el viento, también ha sido analizada en otros estudios. Wang et al. (2010) investigaron la influencia de la velocidad del viento en la medición de la transmitancia térmica y obtuvieron como resultado que las velocidades altas de viento tienen una influencia significativa en el comportamiento del flujo de calor, con errores

superiores al 1,6 % para velocidades mayores a 1 m/s. La lluvia, la nieve y la humedad también influyen de manera considerable en la transmitancia térmica, ya que el agua tiene una conductividad térmica más alta que los materiales típicos de construcción, por lo que su presencia puede alterar el comportamiento térmico del muro. En este sentido, la presencia de humedad puede suponer variaciones de hasta un 71 % en el valor de transmitancia térmica con respecto al mismo cerramiento en condiciones normales (Björk & Enochsson, 2009; Litti et al., 2015).

Asimismo, también es necesario tener en cuenta la influencia de la orientación en el valor de la transmitancia térmica. Ahmad et al. (2014) demostraron que los muros orientados hacia el sur, este y oeste presentan un flujo de calor mayor que los orientados hacia el norte, pudiéndose obtener desviaciones superiores al 37,3 %. Finalmente, el uso de sistemas de calefacción y el ciclo de funcionamiento de estos durante la realización de los ensayos es un aspecto que debe considerarse. Una práctica habitual para garantizar un gradiente térmico elevado consiste en la utilización de equipos de calefacción. Los ciclos de funcionamiento del equipo de calefacción generan variaciones de la temperatura superficial que modifican el flujo de calor a través del muro, con variaciones significativas en el intercambio de calor convectivo (Evangelisti et al., 2018).

Por tanto, el ensayo se debe ejecutar cumpliendo los siguientes requisitos ambientales: (i) la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior debe ser superior a 10 °C; (ii) la velocidad del viento debe ser inferior a 1 m/s durante el ensayo; (iii) durante el ensayo no se deben producir precipitaciones ni fenómenos de nieve y se debe descartar su aplicación cuando los niveles de humedad sean elevados; y (iv) los equipos y las sondas se deben instalar en una sección de muro orientada hacia el norte.

La duración de los ensayos es otro de los motivos de discrepancia entre las investigaciones que emplean el método. La ISO 9869-1:2014 indica que la duración del ensayo depende de la tipología de cerramiento analizado: (i) para cerramientos ligeros, el ensayo se puede realizar durante la noche para evitar la radiación solar directa; y (ii) para cerramientos pesados, se deben monitorizar en un período comprendido entre 3 y 7 días. La duración mayor en los cerramientos pesados se debe a la dificultad de garantizar unas condiciones estacionarias (McIntyre, 1985). Por consiguiente, ya que hay factores, como la diferencia de temperatura media entre las superficies de la pared y las inversiones del flujo de calor, que influyen en su duración (Atsonios et al., 2017)), en la literatura científica se pueden encontrar estudios en los que se utilizan ciclos de análisis de 72 horas (Ficco et al., 2015), 1 semana (Ahmad et al., 2014; Albatici & Tonelli, 2010; Asdrubali et al., 2014) o duraciones incluso iguales o superiores a 2 semanas (P. Baker, 2011; F. G. N. Li et al., 2014). Un enfoque particular del HFM fue el de Al-sanea et al. (2012) al medir a lo largo del año para obtener los valores promedios en los diferentes períodos estacionales con el objeto de caracterizar mejor el comportamiento energético del edificio. Así pues, la duración del ensayo es un factor propio de cada medición que variará en función de la obtención de unas condiciones estacionarias durante el ensayo o del método de análisis de los datos que se pretenda emplear (para más información, consultar el subapartado 4.3.2).

La necesidad de un período de muestreo mayor constituye una de las principales limitaciones del método termoflujométrico en comparación con otros métodos. Una alternativa para reducir el tiempo de ensayo puede ser la utilización del *Excitation Pulse Method* (Rasooli, Itard, & Ferreira, 2016), una aplicación particular de la ISO 9869-1:2014 basada en la teoría de los factores de respuesta de Mitalas y Stephenson (1967). Este método permite obtener resultados con una desviación inferior al 2 % para mediciones de hora y media con respecto a mediciones largas.

También existe una gran dispersión de criterios en cuanto al período entre lecturas: 5 min (Desogus et al., 2011; Evangelisti et al., 2015), 15 min (Albatici & Tonelli, 2010; Ficco et al.,

2015), 30 min (Ficco et al., 2015), 60 min (Ficco et al., 2015) o 90 min (Ficco et al., 2015). Sin embargo, la aplicación de intervalos de muestreo muy bajos o muy altos no es recomendable debido a la gran cantidad de instancias generadas en el conjunto de datos obtenido (dificultando el procesado de los datos) o a la posible pérdida de información, respectivamente.

4.3.2. HFM: Análisis de datos

Todos estos factores operacionales y metrológicos influyen en la representatividad de los resultados, aunque también es necesario tener en cuenta el tipo de análisis realizado a los conjuntos de datos obtenidos. Cesaratto y Carli (2013) establecieron que la precisión del resultado obtenido se puede mejorar mediante el filtrado deliberado de los datos para aquellas instancias con un gradiente térmico elevado. Este filtrado puede ser para las instancias que cumplan las siguientes condiciones: (i) diferencia de temperatura entre el interior y exterior mayor a 10 °C; (ii) velocidades de viento inferiores a 1 m/s; (iii) sin precipitaciones; y (iv) las instancias correspondientes al ciclo de inicio y fin de funcionamiento de los sistemas de climatización. El efecto del viento y de la lluvia puede perdurar entre 2 y 6 horas desde su finalización (Tejedor et al., 2017), por lo que también se podrían descartar las instancias incluidas en esos períodos.

Por tanto, el procesado de los datos influye de manera significativa en los resultados, con variaciones de hasta un 20 % para un mismo conjunto de datos en función del método empleado (Cesaratto & De Carli, 2013). Los datos se pueden analizar mediante dos clases principales de procedimientos: los métodos de condiciones estacionarias y los métodos dinámicos (International Organization for Standardization, 2014). Las herramientas informáticas utilizadas para ello pueden variar en función del enfoque escogido, pudiendo usar software clásicos para el tratamiento y el análisis de datos o específicos para los métodos dinámicos, como CTSM (Juhl et al., 2013), LORD (Gutschker, 2004) o MRQT (Van Dijk et al., 1994).

4.3.2.1. HFM: Métodos de condiciones estacionarias

Los métodos de condiciones estacionarias se caracterizan por la medición directa del flujo de calor y de las temperaturas de aire interior y exterior. En los estudios científicos existen dos métodos: el método promedio (véase Ecuación (7)) y el método promedio con correcciones por efecto de almacenamiento (véase Ecuación (8)). Para la Ecuación (7) no resulta necesario tener un conocimiento previo de la fachada, mientras que para la Ecuación (8) es imprescindible conocer las propiedades termofísicas de los materiales del cerramiento.

Al analizar cada método de condiciones estacionarias, el método promedio considera que la media de las mediciones instantáneas de flujo de calor y las diferencias de temperatura entre los ambientes interior y exterior en un período de tiempo creciente permite suavizar las oscilaciones que derivan a un valor de transmitancia térmica en estado estacionario (véase Ecuación (7)). Se trata del método de condiciones estacionarias de mayor uso en las investigaciones analizadas.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})} \quad (7)$$

Donde q_j [W/m²] es el flujo de calor del cerramiento en el instante j y $T_{in,j}$ y $T_{ext,j}$ [K] son las temperaturas ambientales interior y exterior en el instante j , respectivamente.

La misma norma ISO 9869-1:2014 propone una modificación de la Ecuación (7) teniendo en cuenta el efecto de almacenamiento de calor (International Organization for Standardization,

2014). Asimismo, la norma indica que debe aplicarse cuando el valor de resistencia térmica obtenido al final del ensayo varía más de un 5 % con respecto al medido 24 horas antes o al del primer período, obtenido como $INT(2xD_T/3)$, donde INT es la parte entera y D_T es la duración total de días de ensayo.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j - \frac{(F_{in} \cdot \delta T_{in} + F_{ext} \cdot \delta T_{ext})}{\Delta t}}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})} \quad (8)$$

Donde F_{in} [$J/(m^2 \cdot K)$] es el factor de masa térmica total interior, δT_{in} [K] es la diferencia entre la temperatura de aire interior media de las 24 horas anteriores a la medición y la temperatura del aire interior media de las primeras 24 horas del ensayo, F_{ext} [$J/(m^2 \cdot K)$] es el factor de masa térmica total exterior, δT_{ext} [K] es la diferencia entre la temperatura de aire exterior media de las 24 horas anteriores a la medición y la temperatura del aire exterior media de las primeras 24 horas del ensayo y Δt [s] es el intervalo de tiempo entre las medidas. Para obtener los factores de masa térmica del cerramiento, es necesario tener un conocimiento previo de sus capas y de sus propiedades térmicas (véase Ecuaciones (9) y (10)).

$$F_{in} = \sum_{k=1}^N C_k \left[\frac{R_{ext,k}}{R} + \frac{R_k^2}{3R^2} - \frac{R_{in,k} \cdot R_{ext,k}}{R^2} \right] \quad (9)$$

$$F_{ext} = \sum_{k=1}^N C_k \left[\frac{R_k}{R} \left\{ \frac{1}{6} + \frac{R_{in,k} + R_{ext,k}}{3R} \right\} + \frac{R_{in,k} \cdot R_{ext,k}}{R^2} \right] \quad (10)$$

Donde $R_{ext,k}$ [$(m^2 \cdot K)/W$] es el sumatorio de las resistencias térmicas exteriores desde la capa $k+1$ hasta el aire exterior, $R_{in,k}$ [$(m^2 \cdot K)/W$] es el sumatorio de las resistencias térmicas interiores desde la capa $k-1$ hasta el aire interior, C_k [$J/(m^2 \cdot K)$] es la capacidad térmica de la capa k , R_k [$(m^2 \cdot K)/W$] es la resistencia térmica de la capa k y R [$(m^2 \cdot K)/W$] es la resistencia térmica del cerramiento.

En líneas generales, las Ecuaciones (7) y (8) obtienen resultados muy similares (Choi & Ko, 2017; Deconinck & Roels, 2016), aunque al considerar el efecto de almacenamiento de calor, el tiempo de realización del ensayo disminuye. No obstante, para su aplicación es necesario disponer de un conocimiento previo de las propiedades termofísicas del muro, las cuales limitan su utilización práctica. Mientras que para la Ecuación (7) se obtiene un porcentaje de desviación del 10 % a los 8 días del ensayo, dicho porcentaje se puede obtener a los 3 o 4 días con la Ecuación (8) (Deconinck & Roels, 2016). Aunque su aplicación es simple, la dificultad de conseguir unas condiciones de estado estacionario estables en el tiempo puede obligar a analizar los datos mediante métodos dinámicos.

4.3.2.2. HFM: Métodos dinámicos

Con respecto a los métodos dinámicos, Roulet et al. (1985) propusieron uno de los primeros métodos de análisis dinámico teniendo en cuenta las variaciones térmicas mediante el uso de la ecuación de calor de Ahvenainen et al. (1980), de Aittomäki (1972) y de Kupke (1976). Este método se ha incluido en el anexo B de la ISO 9869-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014). El elemento de construcción se representa en el modelo a través de su conductancia térmica y de varias constantes de tiempo. Estos parámetros desconocidos se obtienen mediante una técnica de identificación que utiliza las densidades medidas de las tasas de flujo de calor y las temperaturas, debiendo resolver un conjunto de ecuaciones lineales que se pueden escribir en forma de matriz:

$$\vec{q} = (X) \cdot \vec{Z} \quad (11)$$

Donde \vec{q} es un vector cuyos componentes M son los últimos M datos de densidad de flujo de calor q_j , siendo M mayor que el número de parámetros desconocidos N , (X) es una matriz rectangular con M filas y N columnas y \vec{Z} es un vector de N componentes de parámetros desconocidos cuyo primer componente es la transmitancia térmica. El conjunto de ecuaciones da una estimación del vector \vec{Z} (véase Ecuación (12)). Es importante destacar que las constantes de tiempo se desconocen. El procedimiento intenta buscar la mejor estimación de dichas constantes en un procedimiento iterativo, aunque puede que no converja y se deba descartar el resultado (Roulet et al., 1985).

$$\vec{Z} = [(X)'(X)]^{-1}(X)'q \quad (12)$$

Donde $(X)'$ es la matriz transpuesta de (X) .

Un enfoque similar y simplificado al de Roulet et al. (1985) fue adoptado por Anderlind (1992, 1996), ya que consideró que las oscilaciones de la parte transitoria cubren las variaciones en las mediciones de flujo de calor inducidas por las variaciones de temperatura, de tal manera que el comportamiento estacionario de la pared se puede aislar. Así pues, el flujo de calor a través del cerramiento se estructura en tres partes (véase Ecuación (13)): una primera parte que tiene en cuenta el comportamiento estacionario de las mediciones de flujo de calor, y una segunda y una tercera parte que describen las fluctuaciones instantáneas del flujo de calor debido a los cambios de temperatura superficial en ambas caras del cerramiento.

$$q_j = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{R'} (T_{s,in,j} - T_{s,ext,j}) + \sum_{l=j-p}^{j-1} A_l (T_{s,in,l+1} - T_{s,in,l}) + \sum_{l=j-p}^{j-1} B_l (T_{s,ext,l+1} - T_{s,ext,l}) \right) \quad (13)$$

Donde $T_{s,in,j}$ [K] es la temperatura superficial interior del muro en un instante j , $T_{s,ext,j}$ [K] es la temperatura superficial exterior del muro en un instante j , p el número de datos históricos utilizados para ajustar el modelo, l es el instante de comienzo de las instancias utilizadas en el análisis y R' , A_l y B_l son los coeficientes de regresión. Uno de los aspectos para determinar con el método es cuánto tiempo es necesario considerar para ajustar al modelo. Deconinck y Roels (2016) concluyeron que el tiempo de ajuste debe ser una relación de 5/6 sobre el conjunto de instancias medidas, debiendo ser 3 días el tiempo máximo de análisis.

Otra clase de modelos dinámicos que surgieron en los últimos años fue desarrollado por diversos autores (Jiménez et al., 2008; Naveros et al., 2015; Norlén, 1990, 1994) mediante el uso de un modelo dinámico lineal de auto regresión con variables exógenas (en inglés, *autoregressive models with exogenous variables* (ARX)). Se trata de un modelo de caja negra con el que se puede estimar la resistencia térmica del cerramiento, junto con una desviación estándar que determine la exactitud del resultado. El modelo se basa en el ajuste del flujo de calor mediante las temperaturas medidas en un instante determinado, así como en las temperaturas y en el flujo de calor medidos previamente. Así pues, la expresión para determinar el flujo de calor en un instante j es el siguiente:

$$\begin{aligned} Q(B)q_j &= \omega_{s,in}(B) \cdot T_{s,in,j} + \omega_{s,ext}(B) \cdot T_{s,ext,j} + e_j \\ \text{con } Q(B)q_j &= 1 + Q_1 \cdot B^1 + \dots + Q_{nq} \cdot B^{nq} \\ \omega_{s,in}(B) &= \omega_{s,in,0} + \omega_{s,in,1} \cdot B^1 + \dots + \omega_{s,in,ni} \cdot B^{ni} \\ \omega_{s,ext}(B) &= \omega_{s,ext,0} + \omega_{s,ext,1} \cdot B^1 + \dots + \omega_{s,ext,ne} \cdot B^{ne} \end{aligned} \quad (14)$$

Donde B es el operador de retroceso, $Q(B)$ es el polinomio de entrada, e_j es el error de simulación, $\omega_{s,in}(B)$ y $\omega_{s,ext}(B)$ son los polinomios de salida, ni y ne son los órdenes de los

polinomios de entrada y nq es el orden del polinomio de salida. Los órdenes polinomiales y el tiempo de muestreo deberán seleccionarse de manera adecuada para caracterizar la transmitancia térmica (Deconinck & Roels, 2016).

Un cuarto modelo de análisis dinámico son los modelos estocásticos, los cuales caracterizan el cerramiento mediante el conocimiento físico previo de este y aportan una interpretación física, al contrario que los modelos ARX. Comparado con los modelos vistos anteriormente, los modelos de caja gris pueden describir fenómenos complejos y estructuras de datos (Madsen et al., 2015). La transferencia de calor en el elemento estudiado se describe como un conjunto de ecuaciones diferenciales estocásticas continuas, formuladas a través de los estados considerados. En este sentido, existen multitud de investigaciones en las que se utilizan estos modelos (P. H. Baker & van Dijk, 2008; Deconinck & Roels, 2015; Gutschker, 2008; Jiménez et al., 2009; Naveros et al., 2014), los cuales varían según los estados propuestos por los autores, describiendo el flujo de calor en función de las temperaturas y de las resistencias y capacidades térmicas del muro.

Recientemente, Biddulph et al. (2014) planteó un planteamiento diferente al desarrollar un modelo de masa térmica concentrada para caracterizar el muro e inferir la relación de los parámetros que incorpora mediante redes bayesianas (modelos de caja gris). El modelo incorpora cuatro parámetros desconocidos: (i) la unidad de resistencia térmica del área entre el aire interno y la masa térmica (R_1); (ii) la unidad de resistencia térmica del área entre la masa térmica y el aire externo (R_2); (iii) la capacidad térmica del muro (C); y (iv) la temperatura de la masa térmica al inicio del test ($T_{masa, inicial}$). Este conjunto de parámetros permite reproducir mejor el flujo de calor medido. El flujo de calor en cada instante de tiempo j que entra al cerramiento desde el aire interno a la masa térmica se calcula usando la ecuación de flujo de calor en estado estacionario:

$$q_j = \frac{T_{in,j} - T_{masa,j}}{R_1} \quad (15)$$

Donde $T_{masa,j}$ [K] es la temperatura de masa térmica prevista en el instante j . $T_{masa,j}$ se inicializa de $T_{masa, inicial}$ y, para los siguientes instantes de tiempo ($j+1$), se usa la ecuación de diferencia de avance del balance de flujo de calor:

$$T_{masa,j+1} = \frac{\frac{T_{in,j+1}}{R_1} + \frac{T_{ext,j+1}}{R_2} + C \cdot \frac{T_{masa,j}}{\tau}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{C}{\tau}} \quad (16)$$

Donde τ [s] es la diferencia de tiempo entre las lecturas del registrador de datos. Asimismo, los autores han desarrollado una modificación del modelo para dos masas térmicas con una mejor estimación con respecto al modelo previo (Gori et al., 2017).

La aplicación de los distintos métodos dinámicos reduce la duración de los ensayos (Biddulph et al., 2014; Choi & Ko, 2017; Deconinck & Roels, 2016). En este sentido, el método de Anderlind (1992, 1996) presenta una mayor exactitud en períodos más cortos de tiempo que el modelo de ARX y los modelos de caja gris (Deconinck & Roels, 2016), aunque en períodos más largos, los otros dos modelos presentan una mayor exactitud. Además, los ensayos realizados en las estaciones de primavera y verano pueden obtener resultados representativos a través de estos modelos, aunque el error sea mayor que para otras estaciones más ideales debido a la acumulación de errores sistemáticos (Biddulph et al., 2014). Para estos casos, los modelos de caja gris son los que mejor ajuste presentan, ya que son menos sensibles a las variaciones de temperatura (Deconinck & Roels, 2016).

4.4. Método termométrico (THM)

El método termométrico (en inglés, *thermometric method* (THM)) es un método no destructivo que consiste en la obtención del valor de transmitancia térmica mediante la medición de la temperatura superficial interior del muro y de las temperaturas de los ambientes que el elemento separa. El THM se basa en la Ley del Enfriamiento de Newton, la cual establece que, cuando la diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno no es elevada, la tasa de calor transferida por conducción, convección y radiación es prácticamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el entorno:

$$\frac{dQ}{dt} = S \cdot h \cdot [T - T_{\text{ambiente}}] \quad (17)$$

Donde Q [J] es la energía térmica, S [m²] es el área de transferencia de calor del cuerpo, h [W/(m²K)] es el coeficiente de transferencia de calor, T [K] es la temperatura del cuerpo y T_{ambiente} [K] es la temperatura ambiental. Mediante la Ecuación (17), el flujo de calor se puede expresar mediante una nueva expresión (véase Ecuación (18)). Con la Ecuación (18), la ecuación del HFM (véase Ecuación (7)) se puede modificar, de manera que se obtiene la expresión utilizada para el THM (véase Ecuación (19)).

$$q_j = h_{in} \cdot (T_{in,j} - T_{s,in,j}) \quad (18)$$

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n h_{in} (T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})} \quad (19)$$

Donde h_{in} [W/(m²·K)] es el coeficiente de transferencia total de calor interior.

Así pues, la principal diferencia que presenta el THM con respecto al HFM es que no necesita medir el flujo de calor del cerramiento (véase Figura 17). Se trata de un método con un gran uso a nivel profesional, siendo incluso empleado por laboratorios acreditados de la comunidad autónoma de Andalucía (Junta de Andalucía, 2017). Sin embargo, a pesar de tener una gran aplicación, no hay ninguna norma de ensayo ni investigaciones al respecto que lo desarrollen: solamente existen las recomendaciones de ensayo de los fabricantes, como las de KIMO INSTRUMENTS (2010) o las de TESTO (2014).

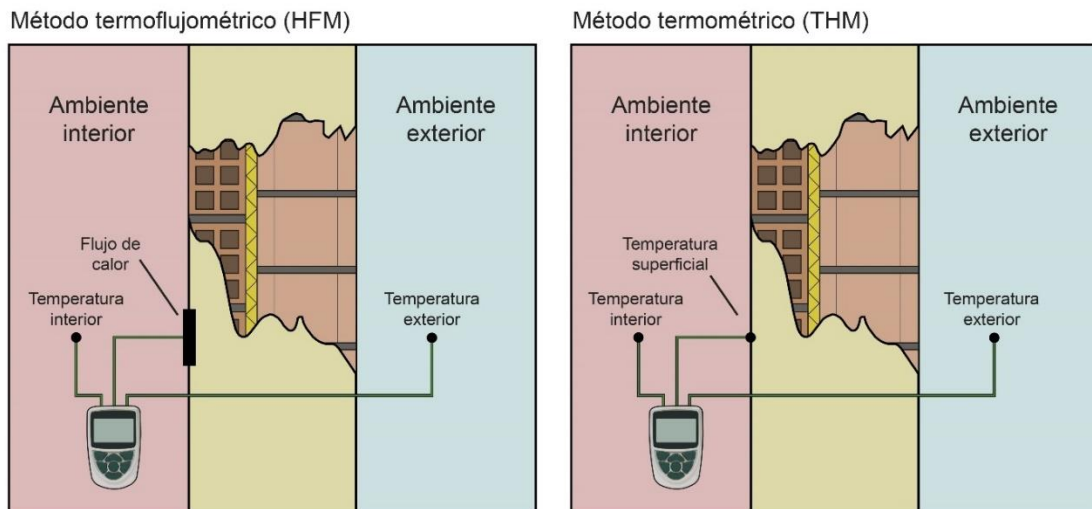


Figura 17. Boceto de la diferencia existente entre los métodos termoflujométrico y termométrico. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Pérez-Ordoñez, et al. (2020)).

Para la realización del ensayo son necesarios los siguientes equipos: (i) dos sondas de temperatura; (ii) tres sondas de temperatura superficial; y (iii) un gestor de datos. Al igual que para el HFM, también resulta conveniente emplear una estación meteorológica para el control de las variables meteorológicas durante el ensayo, así como una cámara termográfica para la valoración previa de la envolvente.

Los criterios de colocación de los equipos son: (i) los 3 sensores de temperatura superficial interior se deben colocar a una altura de 1,5 m y unidos al cerramiento mediante un adhesivo conductor de calor, con una separación de entre 10 cm y 15 cm entre ellos (TESTO AG, 2014) y de 20 mm con respecto a las juntas de mortero de las piezas de la capa interior (véase Figura 18) (Meng et al., 2015). La valoración cualitativa mediante termografía infrarroja puede servir para determinar la ubicación de las juntas de mortero y, en el caso de que no se puedan apreciar, las sondas se deben instalar evitando que estén alineadas vertical u horizontalmente (Meng et al., 2015); y (ii) los sensores de temperatura de aire se deben colocar a una altura de 1,5 m y lo más alineados posible, con una separación entre 30 cm y 40 cm del cerramiento para evitar efectos convectivos. Al igual que el HFM, el mobiliario existente y el comportamiento de los inquilinos puede limitar o afectar al montaje de las sondas (P. Baker, 2011; Birchall et al., 2011; Meng et al., 2015).

El método presenta como ventaja principal que no tiene asociados los errores de medición debidos al uso de la placa medidora de flujo de calor que se han descritos para el HFM. Se debe evitar colocar los sensores de temperatura superficial en la junta de mortero o en la zona de influencia próxima a la junta (Meng et al., 2015), siendo el error asociado a la ubicación de estos sensores de hasta un 6 %. Aunque la probabilidad de colocarlos en estas zonas es pequeña debido al poco espesor que suelen tener las juntas, el error asociado es significativo. La utilización de termografía infrarroja, así como evitar que las sondas se encuentren alineadas permitirían eludir dicho error (véase Figura 18). Es de suponer que la necesidad de un gradiente térmico elevado y una estabilidad en las condiciones estacionarias a lo largo del tiempo de monitorización permitirían la obtención de resultados representativos. Asimismo, algunos factores operacionales, tales como evitar fuentes de radiación (tanto solar como artificiales) y la colocación de las sondas alejadas de puentes térmicos, se deberían considerar para obtener resultados representativos. Con respecto a la duración del ensayo, los únicos criterios establecidos por los fabricantes son que la medición debe durar una noche. Por lo tanto, existe una cierta similitud con la duración recomendada en la ISO 9869-1:2014 para cerramientos ligeros, aunque para cerramientos pesados es de suponer que sea necesario una duración mayor.

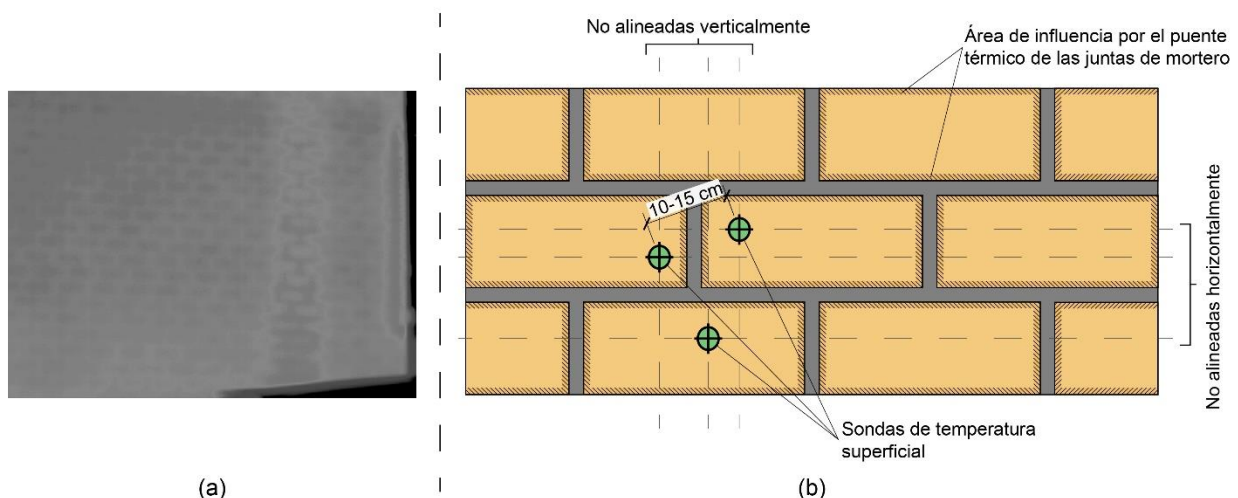


Figura 18. Influencia de las juntas de mortero en el THM: (a) termograma de la superficie interior de una fachada donde se pueden apreciar las juntas de mortero y (b) criterios de colocación de las sondas de temperatura superficial. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

En este sentido, algunas investigaciones llevadas a cabo por otros autores (posteriores a las publicaciones compendiadas en esta tesis) destacan que el ensayo se debe realizar entre 72 y 168 horas, aunque si se garantizan unas condiciones estables, se puede monitorizar sólo durante la madrugada, con una desviación promedia de 2,63 % en comparación con mediciones largas (Kim et al., 2018).

Con respecto a las variables de entrada en el método, el valor asignado a h_{in} , según los planteamientos de los fabricantes, es un valor teórico. En este sentido, las aplicaciones profesionales del THM usan un valor de 7,69 W/(m²·K) obtenido de la inversa de la resistencia térmica superficial interior ($R_{s,in}$) para flujos horizontales de la ISO 6946:2007 (International Organization for Standardization, 2007b). Tal y como indica el anexo A de dicha normativa, este valor es representativo para los cerramientos cuyos materiales tengan una emisividad próxima a 0,9 y cuyas condiciones interiores de contorno oscilen entre los 20 °C y los 25 °C. Dado que un cerramiento convencional suele cumplir estas dos condiciones, dicho valor se puede aplicar en la mayor parte de los cerramientos del parque inmobiliario.

4.5. Método de termografía infrarroja cuantitativa (QIRT)

Ante la dificultad de aplicación del HFM, en los últimos años se han desarrollado métodos para obtener la transmitancia térmica mediante el uso cuantitativo de la termografía infrarroja (en inglés, *quantitative infrared thermography method* (QIRT)). Tradicionalmente, la termografía infrarroja ha sido ampliamente utilizada, tanto desde la vertiente médica como militar.

En el campo de la auditoría energética, la termografía infrarroja se ha empleado de manera frecuente para realizar análisis cualitativos de las envolventes de los edificios (Bagavathiappan, Lahiri, Saravanan, Philip, & Jayakumar, 2013; Balaras & Argiriou, 2002; Kylili, Fokaides, Christou, & Kalogirou, 2014; Lucchi, 2018), teniendo una gran variedad de usos, entre los que se pueden destacar (véase Figura 19):

- La detección de anomalías térmicas (Barreira, Almeida, & Delgado, 2016; Litti et al., 2015). Se trata del uso principal que ha tenido la termografía infrarroja en el campo de la auditoría energética.
- La detección de puentes térmicos (Bienvenido-Huertas, Quiñones, Moyano, & Rodríguez-Jiménez, 2018; O'Grady, Lechowska, & Harte, 2017).
- Las infiltraciones de aire complementado con el ensayo de puerta soplante (Sfakianaki et al., 2008; Taylor, Counsell, & Gill, 2013).

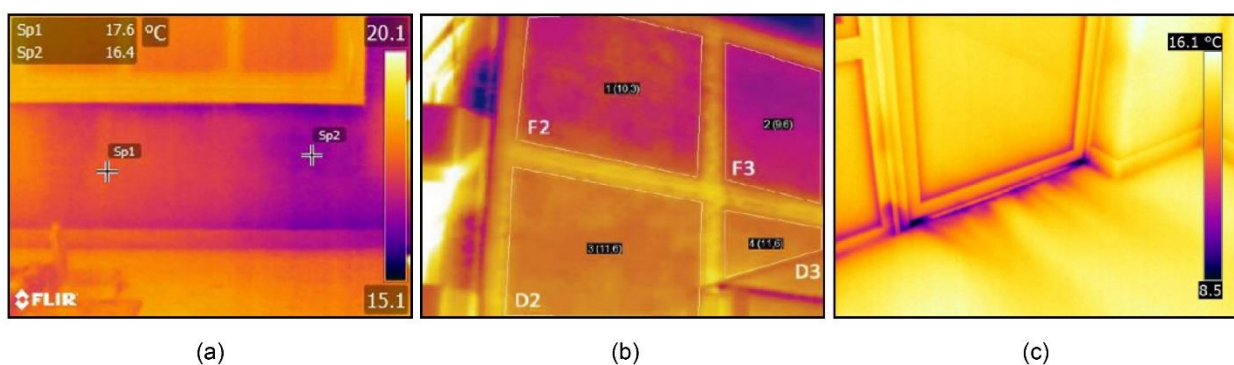


Figura 19. Ejemplos de termogramas para diferentes tipos de análisis cualitativo realizados en fachadas: (a) anomalías térmicas; (b) puentes térmicos de frente de forjado y pilares en fachadas; y (c) infiltraciones de aire a través de las carpinterías. Fuente: (a) Litti et al. (2015); (b) Bienvenido-Huertas et al. (2018); y (c) Taylor et al. (2013).

Sin embargo, en la última década han aparecido una serie de estudios en los que se analiza su aplicación para determinar la transmitancia térmica. Este método utiliza la termografía infrarroja para medir principalmente la temperatura superficial, la emisividad y la temperatura aparente reflejada, aunque también puede medir otras variables, como la temperatura del aire interior y exterior (Albatici & Tonelli, 2010).

Estos métodos tienen la ventaja de ser no destructivos y rápidos, a la vez que permiten hacer un análisis cualitativo del cerramiento. Por lo tanto, es posible evaluar la transmitancia térmica sin el riesgo de evaluar de manera errónea una zona afectada por puentes térmicos, tal y como ocurre en el HFM o en el THM.

Además, los ensayos se pueden realizar en un período corto de tiempo, por lo que el tiempo de monitorización se reduce en comparación con otros métodos, como el HFM o el THM. La investigación en los últimos años ha estado enfocada en la propuesta y en el análisis de los distintos métodos (véase Tabla 16), los cuales se pueden dividir en dos categorías: métodos desde el interior y desde el exterior del cerramiento. Cada planteamiento presenta un enfoque diferente desde el punto de vista de la ejecución del ensayo y desde el análisis de los datos.

Temática	Comentario	Referencias
Diseño de los métodos de QIRT desde el interior	Investigaciones de diseño de los métodos QIRT desde el interior	- Fokaides y Kalogirou (2011) - Madding (2008)
Diseño de los métodos de QIRT desde el exterior	Investigaciones de diseño de los métodos QIRT desde el exterior	- Albatici et al. (2008, 2010, 2015) - Dall'O et al. (2013)
Aplicación del QIRT	Investigaciones de aplicación práctica del QIRT en casos de estudio	- Albatici et al. (2008, 2010, 2015) - Choi y Ko (2017) - Dall'O et al. (2013) - Fokaides y Kalogirou (2011) - Madding (2008)
Limitaciones metrológicas y operacionales	Investigaciones de análisis de las limitaciones metrológicas asociadas a la utilización de los diferentes equipos	- Albatici et al. (2008, 2010, 2015) - Dall'O et al. (2013) - Grinzato et al. (2010) - Madding (2008)
Influencia de los factores ambientales	Investigaciones de análisis de la influencia de los factores ambientales, tales como el gradiente térmico o la velocidad del viento, sobre la representatividad de los resultados	- Albatici et al. (2008, 2010, 2015) - Avdelidis y Moropoulou (2003) - Fokaides y Kalogirou (2011) - Lehmann et al. (2013)
Procesado y análisis de los datos	Investigaciones de propuesta, de aplicación y de estudio de métodos de análisis de los datos para el QIRT	- Kisilewicz y Wrobel (2010) - Larbi Youcef et al. (2012)

Tabla 16. Resumen de los trabajos de investigación del QIRT. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

El primer estudio se realizó en el año 2008, cuando Madding (2008) propuso calcular la transmitancia térmica empleando la contribución convectiva interior y la contribución radiativa expresada como una linealización de la ley de Stephan-Boltzmann:

$$U = \frac{4\varepsilon\sigma \left(\frac{T_{s,in} + T_{refl}}{2}\right)^3 (T_{s,in} - T_{refl}) + h_{in} \cdot (T_{s,in} - T_{in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (20)$$

Donde ε [adimensional] es la emisividad del cerramiento, σ es la constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$] y T_{refl} [K] es la temperatura aparente reflejada.

Una propuesta de formulación similar fue planteada por Fokaides y Kalogirou (2011), con la salvedad de que, en vez de utilizar la tercera potencia de la media de las temperaturas superficial interior y reflejada, solamente la aplica para la temperatura superficial, obteniendo la siguiente expresión:

$$U = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{s,in}^3 \cdot (T_{s,in} - T_{refl}) + h_{in} \cdot (T_{s,in} - T_{in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (21)$$

Los coeficientes de convección usados para las Ecuaciones (20) y (21) son dispares según los autores: mientras que para la Ecuación (20) se propone la utilización de las correlaciones de Holman (1986) y de Earle (1983), para la Ecuación (21) se emplea el valor tabulado de la ISO 6946:2007.

Tanto la Ecuación (20) como la (21) están pensadas para llevar a cabo las mediciones desde el interior. Sin embargo, existen tres enfoques distintos para realizar el ensayo desde el exterior. Uno de ellos fue formulado por Albatici et al. (2008, 2010, 2015) al aplicar el balance de calor en la cara exterior de la fachada. Para la contribución de convección exterior, los autores usaron una correlación de Jürges publicada por Watanabe (1965), pero simplificando la ecuación al eliminar el término constante de la regresión lineal:

$$U = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{s,ext}^4 - T_{ext}^4) + 3,8054 \cdot v \cdot (T_{s,ext} - T_{ext})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (22)$$

Donde v [m/s] es la velocidad de viento local.

Asimismo, Dall'O et al. (2013) aplicaron un equilibrio térmico diferente al de la Ecuación (22), ya que consideraron la equivalencia entre el flujo de calor del cerramiento y el flujo de calor por convección intercambiado con el exterior (véase Ecuación (23)). Para h_{ext} utilizaron la correlación de convección publicada por Watanabe, pero sin simplificarla.

$$U = \frac{(5,8 + 3,8054 \cdot v) \cdot (T_{s,ext} - T_{ext})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (23)$$

Recientemente, una nueva propuesta fue planteada para el método desde el interior. Tejedor et al. (2017) propusieron una nueva aproximación a partir de la equivalencia del flujo de calor a los flujos de convección y radiación. La principal diferencia entre su enfoque y el de las Ecuaciones (20) y (21) se encuentra en el coeficiente de convección que emplean, ya que se trata de una aproximación mediante el uso de números adimensionales.

$$U = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{refl}^4 - T_{s,in}^4) + \frac{k \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2}{L} (T_{in} - T_{s,in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (24)$$

Donde Ra_L [adimensional] es el número de Rayleigh, Pr [adimensional] es el número de Prandtl, k es la conductividad térmica del aire [W/(m·K)] y L es la altura del muro [m].

En el mismo estudio, Tejedor et al. (2017) plantearon una simplificación de la Ecuación (24) al considerar que, en unas condiciones de ensayo típicas, la temperatura interior oscila entre 20 °C y 25 °C y, por tanto, se puede establecer un valor fijo en el número de Prandtl. Esta simplificación dio lugar a la siguiente ecuación:

$$U = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{refl}^4 - T_{s,in}^4) + \frac{k \cdot \{0,825 + 0,325 \cdot Ra_L^{1/6}\}^2}{L} \cdot (T_{in} - T_{s,in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (25)$$

Así pues, no existe consenso en las publicaciones analizadas sobre una propuesta teórica que se adapte a todos los casos de estudio que se analicen, ya que las correlaciones de convección utilizadas por los autores se establecieron para unas condiciones de ensayo determinadas y, por tanto, su aplicación presenta limitaciones ante elementos de otras características, tales como la superficie del elemento de acabado (suave o rugoso), la dirección del viento (barlovento o sotavento), etc.

Para la realización de los diferentes métodos, resulta imprescindible disponer de una cámara termográfica con una matriz de plano focal que esté calibrada previamente por un laboratorio acreditado (Tzifa et al., 2017). Asimismo, se coloca un anemómetro de hilo caliente próximo al muro para medir la velocidad del viento (Albatici & Tonelli, 2010; Albatici et al., 2015): dicho anemómetro consiste en un filamento calentado que está conectado a un circuito eléctrico capaz de monitorizar las variaciones de resistencia eléctrica de un flujo de aire. Las temperaturas de aire interior y exterior se pueden medir con sondas de temperatura (Fokaidis, Maxoulis, Panayiotou, Neophytou, & Kalogirou, 2011; Tejedor et al., 2017) o mediante el procedimiento propuesto por Albatici et al. (2008, 2010, 2015) al considerar elementos que actúan como cuerpos negros: (i) para la temperatura exterior se puede utilizar una caja negra con una pequeña abertura (Albatici & Tonelli, 2010) o un tubo (Albatici & Tonelli, 2010; Ohlsson & Olofsson, 2014); y (ii) para la temperatura interior se puede abrir parcialmente una ventana de la habitación estudiada (Albatici & Tonelli, 2010). La temperatura reflejada se puede medir con la temperatura promedia de un trozo de aluminio arrugado fijado en la superficie, cuya emisividad sea 1,00 (ASTM International, 2014a). Finalmente, para determinar la emisividad se puede emplear: (i) una cinta o material de emisividad conocido y certificado por el fabricante (ASTM International, 2014b); (ii) un termómetro de contacto (ASTM International, 2014b); y (iii) un emisómetro (Albatici, Passerini, Tonelli, & Gialanella, 2013).

Los criterios de colocación de los equipos son los siguientes (véase Figura 20):

- La cámara termográfica se debe colocar a una distancia de 1,5 m con respecto al cerramiento y con un ángulo de entre 15° y 50° para evitar la reflexión del técnico sobre el elemento constructivo (Kylili et al., 2014; Tejedor et al., 2017).
- Todos los elementos necesarios para la medición, como el reflector, se deben ubicar a una altura de 1,5 m sobre el suelo (Tejedor et al., 2017).
- El anemómetro de hilo caliente se debe colocar con una separación de 0,1 m de la superficie de fachada (Albatici et al., 2015). Al contrario que el HFM, el procedimiento de

Albatici et al. (2008, 2010, 2015) hace posible ejecutar el ensayo sin tener que acceder al interior de la vivienda mediante el uso de los cuerpos negros descritos anteriormente. En este punto, es importante describir los requisitos de colocación del cuerpo negro exterior: la caja negra o el tubo se coloca a una altura de 1,5 m y cerca de la fachada, debiendo permanecer entre 15 min y 60 min en el exterior antes de medir. Las medidas del orificio del cuerpo exterior y de la apertura de la ventana se deben realizar con una emisividad de 1.

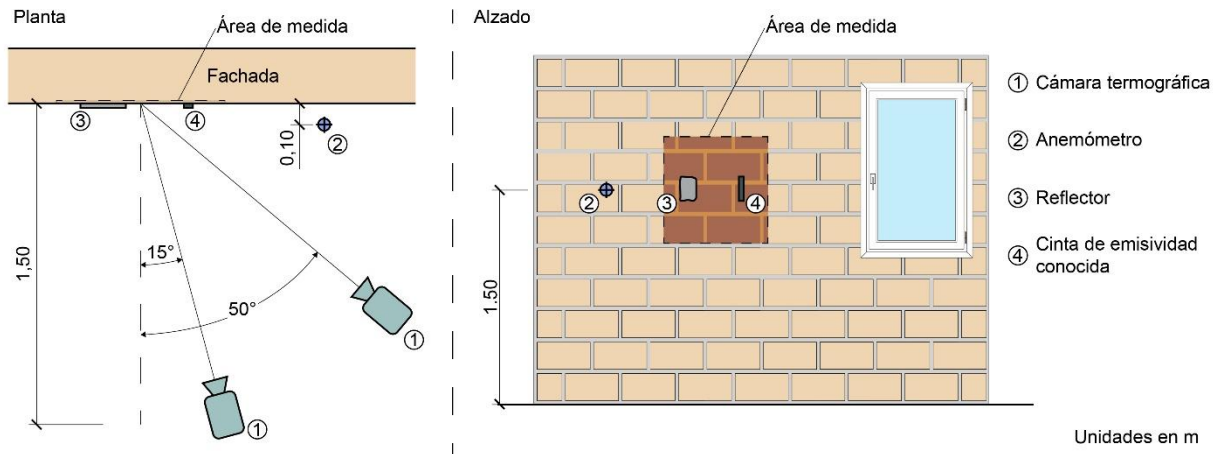


Figura 20. Criterios de colocación de los equipos y de las sondas del QIRT. La utilización de cada sonda o material dependerá del método elegido. En la figura no se distingue entre exterior e interior. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

4.5.1. QIRT: Requisitos metroológicos y condiciones de ensayo

Para la realización del ensayo, el método requiere unas condiciones ambientales muy específicas. Para conseguir unas condiciones cercanas al estado estacionario, resulta importante lograr un estado de transferencia de calor estable durante al menos 3 horas antes de su ejecución (Fokaides & Kalogirou, 2011), de manera que garantice una diferencia mínima de 10 °C entre el interior y el exterior (Albatici & Tonelli, 2010; Albatici et al., 2015; Fokaides & Kalogirou, 2011; Tejedor et al., 2017), siendo el rango de gradiente térmico óptimo entre 7 °C y 16 °C (Tejedor et al., 2018) y teniendo valores de temperatura exterior inferiores a 6 °C durante al menos las 12 horas anteriores. Además, un diferencial bajo entre la temperatura aparente reflejada o superficial y la exterior permite obtener resultados más ajustados. Así pues, las condiciones ideales del ensayo son en invierno, ya que, si se aplica en verano, presenta dificultades para alcanzar un gradiente térmico elevado (Fokaides & Kalogirou, 2011; Tejedor et al., 2017). Asimismo, otros parámetros climáticos tienen una influencia significativa sobre los ensayos (Lehmann et al., 2013; Vijver et al., 2014). Lehmann et al. (2013) determinaron que la temperatura superficial de elementos en instantes de tiempo sin viento era superior a los instantes con viento. También, las velocidades de viento inferiores a 1 m/s garantizan unas condiciones estables de ensayo. Por su parte, Vijver et al. (2014) determinaron la influencia significativa que tiene el efecto combinado del cielo despejado y la radiación solar, con lo cual la franja horaria ideal para realizar el ensayo es de 2 horas antes del amanecer (Albatici et al., 2015). Por consiguiente, el ensayo se debe hacer cumpliendo los siguientes requisitos ambientales: (i) la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior debe estar entre 7 °C y 16 °C; (ii) la velocidad del viento debe oscilar entre 0,1 m/s y 1 m/s (Albatici et al., 2015; Tejedor et al., 2017); (iii) no se deben dar lluvias (Tejedor et al., 2017); y (iv) el muro no debe haber estado expuesto a una radiación directa con el fin de evitar efectos de inercia térmica (Fokaides & Kalogirou, 2011; Lehmann et al., 2013).

La influencia de las variables de entrada sobre la validez de los resultados es muy significativa y puede derivar en la obtención de valores atípicos (Albatici et al., 2015; I Nardi et al., 2015; Ohlsson & Olofsson, 2014). En este sentido, desviaciones del 50 % en la medición de la velocidad del viento, así como de la temperatura de aire interior, exterior y superficial, tienen errores del 9 %, 5 %, 50 % y 50 % en la caracterización de la transmitancia térmica, respectivamente (Albatici et al., 2015). Por tanto, la temperatura superficial se ve muy influenciada por el efecto de puentes térmicos, pudiendo generar desviaciones de hasta un 56 % en el valor obtenido (Grinzato et al., 2010). En el caso de la temperatura aparente reflejada, una desviación de 1 °C puede causar errores de hasta un 100 % en la transmitancia térmica obtenida con las Ecuaciones (20) y (21) (Fokaides & Kalogirou, 2011). Por su parte, la emisividad se determina una sola vez, ya que se trata de un valor fijo en las condiciones normales de funcionamiento de los edificios (Avdelidis & Moropoulou, 2003; Maroy et al., 2017). Asimismo, la tipología del elemento analizado (simple o de varias capas) afecta a las limitaciones de los resultados obtenidos a través de los diferentes métodos (Tejedor et al., 2018)

Además, las características técnicas de la cámara también es un aspecto que se debe considerar a la hora de realizar los ensayos. Madding (2008) determinó la influencia que tiene la resolución de la cámara en la disminución de la incertidumbre y recomienda utilizar la misma cámara para obtener las medidas de temperatura reflejada y superficial interior con el objetivo de evitar errores sistemáticos. Además, la ubicación del anemómetro influye de manera significativa en las Ecuaciones (22) y (23), por lo que mediciones simultáneas disminuyen el error asociado a la velocidad del viento (Ohlsson & Olofsson, 2014).

Los métodos de QIRT presentan un comportamiento similar en función de cómo se realicen las mediciones: los métodos de interior obtienen resultados similares entre sus diversas ecuaciones, al igual que los métodos de exterior (Iole Nardi et al., 2016). En líneas generales, suelen presentar resultados más aproximados al valor de la ISO 6946:2007 que al HFM, con desviaciones entre el 1,7 % y el 154 % (Dall'O' et al., 2013; Fokaides & Kalogirou, 2011; Iole Nardi et al., 2016, 2014) y del 5 % y el 155,17 % (Albatici & Tonelli, 2010; Grinzato et al., 2010; Iole Nardi et al., 2016, 2014), respectivamente.

La realización de medidas instantáneas pueden conllevar a la obtención de resultados no representativos (Kisilewicz & Wrobel, 2010), por lo que sería necesario alargar el ensayo con una duración entre de 2 y 3 horas (Tejedor et al., 2017). Mayores duraciones de ensayo disminuyen la incertidumbre asociada a los resultados (Larbi Youcef et al., 2012), aunque se debe medir en cielo nublado para evitar el efecto de la radiación solar. Al igual que para el HFM, existe falta de consenso con el intervalo de toma de los termogramas, el cual varía entre los diferentes autores: 1 min (Tejedor et al., 2017), 15 min (Madding, 2008), 20 min (Fokaides & Kalogirou, 2011) y 30 min (Iole Nardi et al., 2016). Como mínimo, deben obtenerse 10 medidas instantáneas para poder estimar correctamente la incertidumbre (Tzifa et al., 2017).

4.5.2. QIRT: Análisis de datos

El procesado y el análisis de los datos medidos con el QIRT es más simple que con otros métodos, como el HFM. El procesado se suele hacer con el software comercial del modelo de cámara utilizado en el ensayo (Fokaides & Kalogirou, 2011; Tejedor et al., 2017). Al analizar los termogramas es importante determinar el área de análisis. Según Tejedor et al. (2017), el área óptima de análisis para paredes de una sola hoja es 104x221 px, mientras que para muros de varias hojas es 146x212 px. Debido a las constantes oscilaciones que presenta en un corto período de tiempo, la velocidad del viento se puede considerar como un valor promedio (Dall'O' et al., 2013; Iole Nardi et al., 2016). Para todas las ecuaciones del QIRT, al tratarse de medidas instantáneas, el valor resultante se obtiene mediante el promedio de los valores de transmitancia térmica obtenidos en cada instante (Iole Nardi et al., 2016).

4.6. Análisis crítico del estado de la cuestión

Cada método presenta una serie de ventajas y limitaciones que pueden orientar hacia su utilización en determinadas condiciones. En la Tabla 17 se recogen los beneficios y las limitaciones de cada método. Por un lado, el método teórico-estimativo es un método comúnmente empleado en las auditorías energéticas, ya que presenta como ventaja principal que no necesita realizar ensayos, por lo que es fundamental determinar la composición del cerramiento, la cual se puede hacer mediante diversas técnicas, tales como: (i) el análisis endoscópico; (ii) el uso de documentación técnica fiable o de diferentes bases de datos de catalogación de la envolvente de edificios; y (iii) la estimación basada en construcciones similares. Por otro lado, los métodos de medición *in situ* permiten obtener valores más representativos, aunque la utilización correcta de los métodos está condicionada por múltiples factores, siendo los factores ambientales los más significativos a la hora de monitorizar. De manera resumida, los métodos necesitan los siguientes requisitos ambientales: (i) un gradiente térmico elevado ($T_{in} - T_{ext} > 10$ °C); (ii) velocidades de viento de entre 0 m/s y 1 m/s; (iii) sin precipitaciones; y (iv) no incidencia de radiación solar ni de otras fuentes de radiación.

Método	Beneficios	Limitaciones
Método teórico-estimativo	<ul style="list-style-type: none"> - No realiza ensayo - Procedimiento de cálculo simple - Método no destructivo si no se aplican endoscopias 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertidumbre elevada debido al desconocimiento de la estratigrafía del cerramiento o de sus propiedades termofísicas - Método destructivo si se aplican endoscopias
HFM	<ul style="list-style-type: none"> - Método estandarizado a través de la ISO 9869-1:2014 - Método no destructivo - Dispone de un amplio desarrollo a nivel de investigaciones - Representatividad de los resultados - Diferentes procedimientos de análisis de los datos 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de acceso al interior de la vivienda - Limitaciones a la hora de instalar las sondas debido al mobiliario existente - Influencia del comportamiento de los inquilinos durante la medición - Errores metrológicos asociados al uso de la placa medidora de flujo de calor - Requisitos ambientales exigentes, más propios para regiones frías, que limitan su utilización en regiones cálidas o durante la estación de verano - Larga duración del ensayo, pudiendo ser superior a 2 semanas en algunos casos
THM	<ul style="list-style-type: none"> - Método no destructivo - Gran uso a nivel profesional 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de acceso al interior de la vivienda - Falta de investigaciones que lo analicen
QIRT	<ul style="list-style-type: none"> - Método no destructivo - Dispone de dos alternativas (interior y exterior) que permiten tener un mayor número de posibilidades para abordar las campañas experimentales - Posibilidad de hacer el ensayo sin tener que acceder al interior de la vivienda (solo para los métodos de exterior) - Realización del ensayo en un corto período de tiempo - Estimación de la transmitancia térmica y valoración cualitativa del elemento 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de acceso al interior de la vivienda para los métodos de interior - Errores metrológicos asociados al uso de la cámara infrarroja - Errores metrológicos asociados a la utilización del anemómetro (solo para métodos de exterior) - Requisitos ambientales exigentes, más propios para regiones frías, que limitan su aplicación en regiones cálidas o durante la estación de verano

Tabla 17. Beneficios y limitaciones de los diferentes métodos de caracterización de la transmitancia térmica en fachadas. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Moyano, Marín, et al. (2019)).

Esta revisión de la literatura científica plantea nuevos aspectos no tratados o pendientes de estudiar. En este sentido, uno de los aspectos más relevantes es la falta de investigaciones que analicen el THM. El THM es un método con un amplio uso a nivel profesional gracias a que, por una parte, la sustitución de la placa medidora de flujo de calor por termopares de superficie reduce los costes de adquisición de los equipos y, por otra parte, tienen asociados menores errores en el proceso de medición. Sin embargo, al margen de las recomendaciones indicadas por algunos de los fabricantes de estos equipos, no existe ningún tipo de documentación técnica o investigación que lo desarrolle. Así pues, el análisis de esta metodología de caracterización de la transmitancia térmica supone un aspecto de gran interés por parte tanto de la comunidad profesional de arquitectos, ingenieros y arquitectos técnicos como de los grupos de investigación relacionados con esta temática. Asimismo, proveer al método de una mayor posibilidad de metodologías de análisis de los datos empleando las variables de entrada propias del THM (es decir, la temperatura superficial interior y las temperaturas del aire interior y exterior) dotaría de una mayor riqueza al método de forma similar al HFM.

Por otra parte, los métodos cuantitativos mediante termografía infrarroja constituyen una alternativa interesante para la caracterización térmica de cerramientos debido a la doble posibilidad de evaluación cuantitativa y cualitativa. Sin embargo, a pesar de estas bondades de los métodos, la gran variedad de propuestas existentes en la literatura científica puede dificultar la elección del planteamiento. El análisis de las ecuaciones de las propuestas presenta como diferencia principal la correlación utilizada para el término convectivo, dado que las variaciones en los términos de radiación son insignificantes (véase Figura 21). Por este motivo, resulta necesario no solamente realizar un análisis comparativo entre las propuestas que permita determinar la que presenta una mayor robustez ante varias condiciones de contorno y ante diversos casos de estudio, sino también ampliar el análisis comparativo a un mayor número de expresiones para el término convectivo que han aparecido desde principios del siglo XX. En este sentido, la riqueza de las expresiones es variada, ya que existe un número superior a 90 correlaciones de diferentes tipos: dependientes de la velocidad del viento, de la temperatura superficial o de números adimensionales.

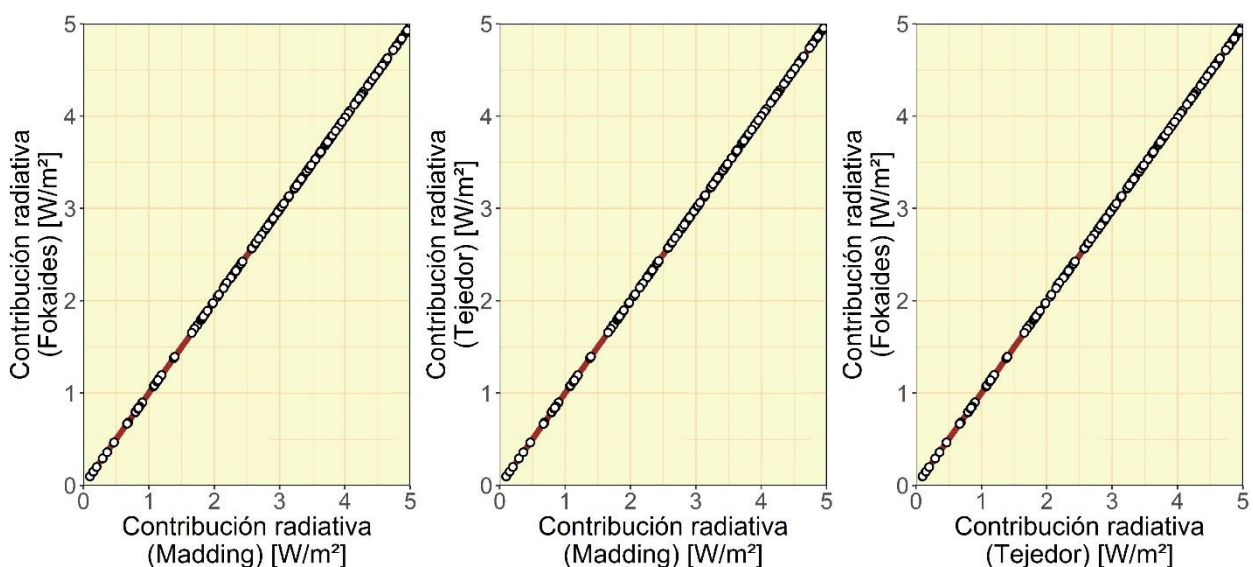


Figura 21. Correlaciones entre los valores de flujo de radiación obtenidos según la ecuación utilizada por Madding (2008), por Fokaides y Kalogirou (2011) y por Tejedor et al. (2017). Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la figura incluida en Bienvenido-Huertas, Bermúdez, Moyano, et al. (2019a)).

Finalmente, el método teórico-estimativo establecido por la norma ISO 6946:2007 es el que tiene una mayor aplicación a nivel global dada su facilidad de uso, aunque el valor que se obtiene está sujeto a una gran incertidumbre. Esta alta probabilidad en la desviación de los

valores obtenidos se debe a que, en la mayoría de los casos, se desconoce la composición constructiva del cerramiento o a que los valores de conductividad térmica utilizados no son representativos. Sin embargo, a pesar de las limitaciones que el método teórico-estimativo presenta, su caracterización puede ser útil como valor de referencia en las evaluaciones *in situ*. En este sentido, el apartado 7.3 de la ISO 9869-1:2014 plantea el empleo de dicho valor para comparar si existe una desviación inferior al 20 % entre el valor medido *in situ* y el valor teórico, y plantea que, si la desviación es superior, puede existir la posibilidad de que hayan ocurrido errores durante el proceso de monitorización. Por tanto, el análisis de nuevas metodologías que hagan posible realizar una estimación precisa de dicho valor de transmitancia térmica supone un aspecto pendiente de estudio, ya que eliminaría una de las principales barreras en la aplicación del método teórico en cerramientos reales.

5. Objetivos

A raíz del análisis del estado de la cuestión realizado en el apartado anterior, existen una serie de ventajas y limitaciones que pueden orientar hacia la utilización de cada método en determinadas condiciones. Sin embargo, se han detectado varias brechas de conocimiento existentes en la literatura científica que son necesarias de abordar.

Por consiguiente, el objetivo general es la optimización de aquellas debilidades o aspectos no reflejados en la literatura científica acerca de los métodos de evaluación *in situ*. Para ello, parte de la hipótesis de que los métodos de caracterización experimental de la transmitancia térmica se pueden aplicar en diferentes condiciones, siempre y cuando se utilicen los procedimientos adecuados.

Para la consecución de este fin, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la correlación de convección, tanto exterior como interior, que mejor se adapte a los métodos cuantitativos de termografía infrarroja. El análisis de diversas correlaciones experimentales de diferencias de temperatura, de viento y de números adimensionales permitirá determinar la correlación que presenta un mayor grado de ajuste en los métodos.
- Evaluar la potencialidad y las limitaciones del método termométrico, así como la optimización de aquellas debilidades que pueda presentar. Asimismo, el análisis de la aplicación de sistemas de predicción que estimen la transmitancia térmica para tipologías de cerramiento con una gran capacidad de almacenamiento de calor mediante el método termométrico abriría un mayor número de posibilidades de aplicación del método. En este sentido, el desarrollo de nuevas metodologías se debe orientar a no tener que conocer la composición constructiva del cerramiento para poder aplicarlas.
- Analizar la posibilidad de utilizar nuevas metodologías de análisis de datos que permitan estimar los resultados de la ISO 6946:2007 (método teórico-estimativo) a través de variables monitorizadas. De esta manera, no será necesario conocer la composición constructiva del cerramiento, eliminando así una de las principales limitaciones de aplicación de la ISO 6946:2007 en cerramientos existentes.

5. Objectives⁷

The analysis of the state of the art carried out in the previous section presents some advantages and limitations which could imply the use of each method under certain conditions. However, a series of existing knowledge gaps have been found in the scientific literature and should be tackled.

The general objective is therefore the optimization of those weaknesses or aspects not reflected in the scientific literature on in-situ methods, using as a hypothesis that the experimental characterization methods of thermal transmittance can be used under various conditions if the adequate procedures are used.

For this purpose, the following objectives are established:

- To determine the convection correlation, both external and internal, which best adapts to quantitative infrared thermography methods. The analysis of different experimental correlations of temperature differences, of wind, and of adimensional numbers will determine the correlation presenting the highest adjustment degree in methods.
- To assess the potential and limitations of the thermometric method, as well as the optimization of those possible weaknesses. Also, the analysis for applying prediction systems estimating the thermal transmittance for wall typologies with a great capacity of heat storage by using the thermometric method would provide a larger number of possibilities to apply the method. The development of new methodologies should be therefore focused on not knowing the constructive composition of the wall to be applied.
- To analyse the possibility of using new data analysis methodologies to estimate the results of ISO 6946 through monitored variables. As a result, knowing the constructive composition of the wall would not be required, thus eliminating one of the main limitations to apply the ISO 6946 method in existing walls.

⁷ En cumplimiento con los criterios necesarios para la mención de Doctorado Internacional, se redacta el Apartado 5 en lengua inglesa.

5. Obiettiv⁸

Sulla scia dell'analisi dello stato della questione messa in atto nel paragrafo precedente, si presentano una serie di vantaggi e limitazioni che possono guidare l'uso di ogni metodo in determinate condizioni. Tuttavia, sono state individuate alcune lacune esistenti nella letteratura scientifica che devono essere colmate.

Pertanto, l'obiettivo generale è quello di ottimizzare le debolezze o gli aspetti che non si riflettono nella letteratura scientifica sui metodi di valutazione interna sul campo, utilizzando come ipotesi che i metodi per la caratterizzazione sperimentale della trasmittanza termica possono essere utilizzati in condizioni diverse, a condizione che siano utilizzate procedure appropriate.

Per il conseguimento di questo fine, si stabiliscono i seguenti obiettivi specifici:

- Determinare la correlazione di convezione, sia esterna che interna, che meglio si adatti ai metodi quantitativi di termografia a infrarossi. L'analisi delle diverse correlazioni sperimentali delle differenze di temperatura, vento e numeri adimensionali permetterà di determinare quella con il maggior grado di regolazione nei metodi.
- Valutare la potenzialità e i limiti del metodo termometrico, così come l'ottimizzazione di quelle debolezze che possa presentare. Inoltre, l'analisi dell'applicazione di sistemi di previsione che consentano la stima della trasmittanza termica per le tipologie di involucri con elevata capacità di accumulo di calore mediante il metodo termometrico consentirebbe di aprire un maggior numero di possibilità di applicazione del metodo. In questo senso, lo sviluppo di nuove metodologie dovrebbe essere orientato al non dover conoscere la composizione costruttiva degli involucri da applicare.
- Analizzare la possibilità di usare metodologie di analisi di dati che permettano di stimare i risultati della ISO 6946 (metodo teorico) attraverso variabili monitorate. In questo modo, si eviterà di dover conoscere la composizione costruttiva dell'involucro, eliminando una delle principali limitazioni dell'applicazione della ISO 6946 negli involucri esistenti.

⁸ En cumplimiento con los criterios necesarios para la mención de Doctorado Internacional, se redacta el Apartado 5 en lengua italiana.

6. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis, la investigación se dividió en 3 procesos claramente diferentes:

- Proceso 1. Campañas experimentales.
- Proceso 2. Simulaciones.
- Proceso 3. Análisis de datos.

Es conveniente destacar que, dentro del flujo de trabajo de la investigación, los dos primeros procesos estuvieron orientados a la obtención de datos para ser usados en el Proceso 3 (véase Figura 22).

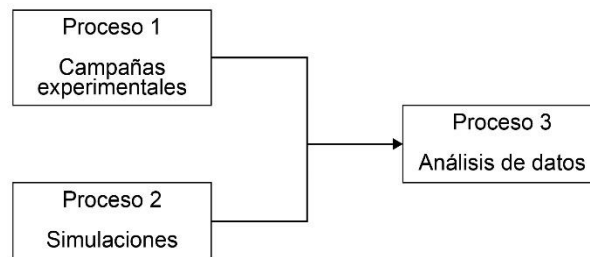


Figura 22. Representación esquemática del flujo de los procesos de trabajo. Fuente: propia.

En los próximos subapartados se describe cada uno de estos procesos. A su vez, para cada proceso, se describen de manera detallada los diferentes subprocesos considerados. Por tanto, los procesos presentan la siguiente estructura:

- Proceso 1. Campañas experimentales.
 - Subproceso 1.1.: Selección previa de los casos de estudio.
En este subproceso se explica qué criterios se siguieron para la evaluación de los cerramientos que fueron objeto de estudio.
 - Subproceso 1.2.: Campañas experimentales realizadas.
En este subproceso se describen las diferentes campañas experimentales llevadas a cabo a lo largo de la investigación. Asimismo, se presentan los equipos empleados y los aspectos operativos de los ensayos realizados.
- Proceso 2. Simulaciones.
En este proceso se hace una descripción detallada del proceso de simulación seguido en la investigación para la obtención de datos de transferencia de calor mediante las metodologías de los ensayos de transmitancia térmica.
- Proceso 3. Análisis de datos.
 - Subproceso 3.1.: Análisis de los resultados de las campañas experimentales y de las correlaciones experimentales del término convectivo utilizadas.

En este subproceso se explica cómo se analizaron los datos obtenidos mediante ensayos experimentales o simulados conforme a los procedimientos analíticos de determinación de la transmitancia térmica (p. ej., el método de la ISO 9869-1:2014 o de la ISO 6946:2007). Asimismo, se indican las correlaciones experimentales consideradas para el análisis del término convectivo en los análisis de termografía infrarroja.

- Subproceso 3.2.: Análisis mediante aprendizaje automático.
En este subproceso se explican los algoritmos de aprendizaje automático empleados en el estudio. Para ello, se elabora una introducción y una explicación de estos para que el lector entienda su funcionamiento. Además, se describe el procedimiento utilizado para el entrenamiento y la validación de los modelos, así como los parámetros estadísticos examinados.
- Subproceso 3.3.: Análisis clúster.
En este subproceso se explica la metodología del análisis clúster usada en el estudio. Al igual que en el análisis mediante aprendizaje automático, se realiza una descripción del análisis clúster para que el lector entienda los principios básicos de esta técnica estadística.

En este punto, cabe señalar que, en los diferentes estudios, no se evaluaron todos los aspectos metodológicos indicados anteriormente. Así pues, hubo algunos estudios, como los de las correlaciones experimentales de termografía infrarroja, que usaron el análisis clúster, mientras que en otros se utilizó el análisis mediante técnicas de aprendizaje automático. En la Tabla 18 se indican los aspectos metodológicos asociados a cada estudio.

Investigación	Proceso 1	Proceso 2	Proceso 3
Evaluación de la potencialidad y de las limitaciones del método termométrico	SP 1.1. SP 1.2.	-	SP 3.1.
Análisis del término convectivo que mejor se adapta a los métodos cuantitativos mediante termografía infrarroja	SP 1.1. SP 1.2.	-	SP 3.1. SP 3.3.
Análisis de aplicación de sistemas de predicción que permitan estimar la transmitancia térmica para tipologías de cerramiento con una gran capacidad de almacenamiento de calor	SP 1.1. SP 1.2.	-	SP 3.1. SP 3.2.
Estudio de optimización del método termométrico	SP 1.2. ⁹	P 2	SP 3.1. SP 3.2.
Estudio de determinación de los resultados de la ISO 6946:2007 con variables <i>in situ</i>	SP 1.2. ⁹	P 2	SP 3.1. SP 3.2.

Tabla 18. Subprocesos (SP) asociados a cada investigación. Fuente: propia.

6.1. Proceso 1. Campañas experimentales

6.1.1. Subproceso 1.1.: Selección previa de los casos de estudio

La selección de los casos de estudio fue un subproceso fundamental para el desarrollo de esta tesis. Tal y como se ha visto en el Apartado 4, las características de los cerramientos influyen

⁹ Únicamente para la obtención de series de tiempo de temperaturas y flujos de calor con el fin de utilizarlas en los procesos de simulación.

de manera significativa en los resultados obtenidos a través de las metodologías de caracterización de la transmitancia térmica.

Por lo tanto, en las fases iniciales de la investigación se realizó una campaña de selección de los casos de estudio que serían utilizados durante las monitorizaciones. Para ello, se debía seleccionar una muestra representativa de inmuebles de diferentes períodos constructivos. En España se distinguen 3 períodos constructivos que son representativos de la mayor parte del parque inmobiliario. Así pues, estos casos de estudio pertenecían a los tres períodos constructivos más representativos del parque inmobiliario en España: el período constructivo 1 (anterior a la NBE-CT 79), el período constructivo 2 (posterior a la NBE-CT 79 y anterior al DB HE) y el período constructivo 3 (posterior al DB HE).

Además, los edificios seleccionados debían presentar los siguientes aspectos:

- Un correcto estado de conservación del inmueble. En este sentido, el inmueble no debía presentar grandes afecciones por puentes térmicos, así como daños ocasionados por humedades. Por tanto, se aplicó la ISO 6781:1983 (International Organization for Standardization, 1983) para valorar que el elemento no presentaba heterogeneidades térmicas. Las evaluaciones termográficas se realizaron cumpliendo estas características:
 - Durante al menos 24 horas antes del inicio de la prueba, la temperatura exterior del aire no debía variar más de ± 10 °C de aquella existente en el momento de comenzar la inspección.
 - Durante la inspección, la temperatura del aire exterior no debía variar más de ± 5 °C y la temperatura del aire interior no más de ± 2 °C respecto a sus valores iniciales.
 - Se descartó la toma de la termografía cuando se detectó que la superficie del cerramiento no estaba seca o cuando hubo precipitaciones en el momento de la medición.
- Posibilidad de colocar los equipos, ya que se tenían que instalar en fachadas orientadas hacia el norte y libres de la presencia de fuentes de radiación directa o reflejada que pudieran distorsionar las medidas. Asimismo, los ensayos se debían realizar en aquellas estancias que tuvieran un impacto nulo por el uso de los habitantes de la vivienda.
- Disponibilidad de documentación técnica del proyecto para estimar con exactitud la composición constructiva de los cerramientos (es decir, el número de capas, los materiales, los espesores y las conductividades térmicas) y, de esta manera, poder determinar la transmitancia térmica según la ISO 6946:2007.

Se llegaron a medir un total 30 cerramientos diferentes ubicados en las ciudades de Cádiz y Sevilla (véase Figura 23). Algunos de los cerramientos fueron objeto de varias monitorizaciones, con lo que el número de ensayos fue superior a 30. En este sentido, y tal y como se indica en el siguiente subapartado, se realizaron 153 mediciones. Asimismo, se dispuso de 13 ensayos de la Agencia de Vivienda y Rehabilitación de Andalucía (AVRA).

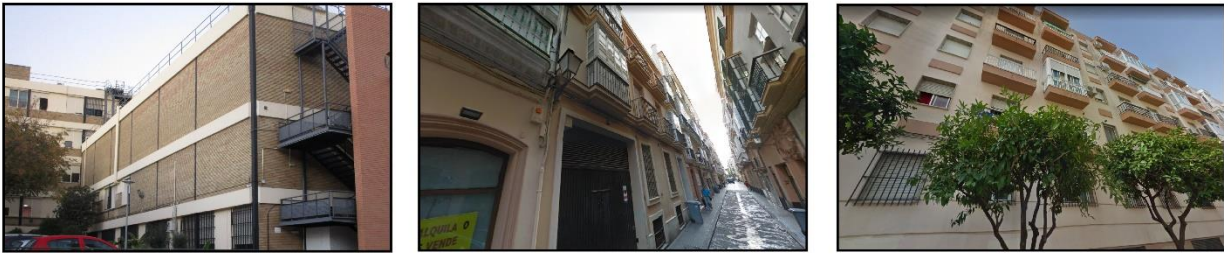


Figura 23. Fotografía de alguno de los edificios analizados. Fuente: propia.

6.1.2. Subproceso 1.2.: Campañas experimentales realizadas

En el marco de esta investigación se pueden destacar dos campañas experimentales:

- Las campañas experimentales relacionadas con la aplicación del método termométrico.
- Las campañas experimentales para determinar la correlación de convección que mejor se ajusta a los planteamientos de termografía infrarroja.

A continuación, se describe de manera detallada cada una de estas campañas.

6.1.2.1. Campaña 1

La campaña 1 consistió en la aplicación de los métodos de transmitancia térmica en una serie de cerramientos. Dependiendo del estudio, el número de cerramientos analizados fue diferente, por lo que el número de monitorizaciones varió entre 8 y 150. Las investigaciones se realizaron en los 30 cerramientos recopilados en la fase previa. En la Tabla 19 se indica el número de mediciones considerados para cada investigación (incluyendo también los ensayos utilizados de AVRA). Es conveniente destacar que, en el caso de las monitorizaciones relacionadas con la optimización del método termométrico, se incluyeron ensayos cuyos resultados no fueron representativos, ya que el objetivo era conseguir una aplicación de la metodología de análisis de datos tanto en condiciones favorables como en condiciones desfavorables.

Para los ensayos se empleó la relación de equipos incluidos en la Tabla 20. Estos equipos fueron facilitados por el Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación y por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en la Edificación de la Universidad de Sevilla. También se usaron equipos de calefacción regulados con termostato con una sonda de temperatura para mantener un gradiente térmico elevado con el exterior en los ensayos realizados en invierno. Asimismo, para garantizar un adecuado contacto entre la placa medidora de flujo de calor y la pared, se utilizó una pasta térmica de contacto modelo HEATGREASE20 con una conductividad térmica de $1,066 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, con un porcentaje de evaporación menor de $0,001 \%$ en $200 \text{ }^\circ\text{C}$ en 24 horas y con un porcentaje de exudación menor de $0,005 \%$ en $200 \text{ }^\circ\text{C}$ en 24 horas.

Estos equipos se colocaron siguiendo los criterios y las recomendaciones existentes en varias normas de ensayo y publicaciones descritas en el Apartado 4.

En primer lugar, el termoflujómetro y los termopares se instalaron lejos de puntos singulares o puentes térmicos para evitar efectos bidimensionales o tridimensionales en el flujo de calor (la utilización de la cámara termográfica facilitó este aspecto en algunos de los cerramientos). Para colocar el termoflujómetro, se le aplicó a este una fina capa de pasta térmica, mientras que los termopares se fijaron a los cerramientos mediante masillas con una alta conductividad

térmica (véase Figura 24). Estas se ubicaron a una distancia de 1,5 metros del suelo, así como con una separación de 10 cm entre ellos y de 20 mm con respecto a las juntas de mortero de las piezas de la capa interior (véase Figura 25 (a)).

Investigación	Número de ensayos propios	Número de ensayos de AVRA	Número total de ensayos
Evaluación de la potencialidad y de las limitaciones del método termométrico	8	-	8
Análisis de aplicación de sistemas de predicción que permitan estimar la transmitancia térmica para tipologías de cerramiento con una gran capacidad de almacenamiento de calor	56	13	69
Estudio de optimización del método termométrico	150	13	163
Estudio de determinación de los resultados de la ISO 6946:2007 con variables <i>in situ</i>	150	13	163

Tabla 19. Número de ensayos correspondientes a cada investigación. Fuente: propia.

Equipo	Variable	Rango de medida	Resolución	Exactitud
Gestor de datos ALMEMO 2590-4AS				
con termopares T 190-3	Temperatura	-10-105 °C	0,1 K	±0,05 K ±0,05 %
con termopares T 190-10	Temperatura	-200-205 °C	0,1 K	±0,05 K ±0,05 %
con placa FQA018C	Flujo de calor	±2000 W/m ²	-	5 %
Gestor de datos TESTO 435-2				
con termopares 0614 1635	Temperatura	-20-70 °C	0,1 °C	±0,1 °C
con termopares 0632 9735	Temperatura	-20-70 °C	0,1 °C	±0,3 °C
Cámara termográfica Fluke TiR1	FOV	23°x17°		
	Rango espectral	7,5-14 μm		
	Sensibilidad térmica	<0,07-30 °C		
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 %
	Precipitación	0-9,99 mm	0,1 mm	1 mm

Tabla 20. Relación de equipos utilizados en la campaña 1. Fuente: propia.

Los sensores de temperatura de aire se colocaron alineados horizontalmente y con una separación del cerramiento de 30 cm para evitar efectos convectivos (véase Figura 25 (b)). En el caso del gestor de datos TESTO 435-2, en la propia conexión de las sondas de temperatura superficial con el gestor de datos dispone de otra sonda de temperatura que se encarga de la medición de la temperatura de aire interior (véase Figura 25 (c)). Por lo tanto, la ubicación de este gestor de datos influye en la medición de la temperatura interior, de manera que se garantizó que el equipo estuviera colocado a una altura similar a la del resto de sondas.

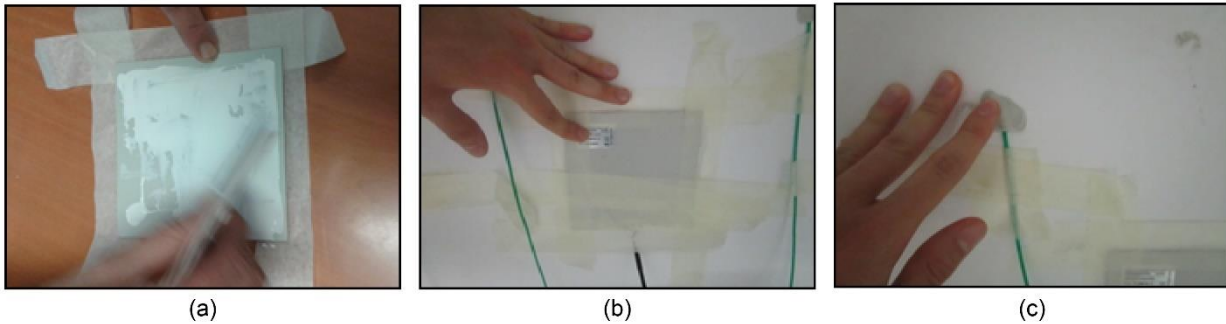


Figura 24. Ejemplos de colocación de los equipos y las sondas I: (a) aplicación de la pasta térmica; (b) colocación de la placa medidora de flujo de calor; y (c) fijación del termopar superficial mediante masilla. Fuente: propia.

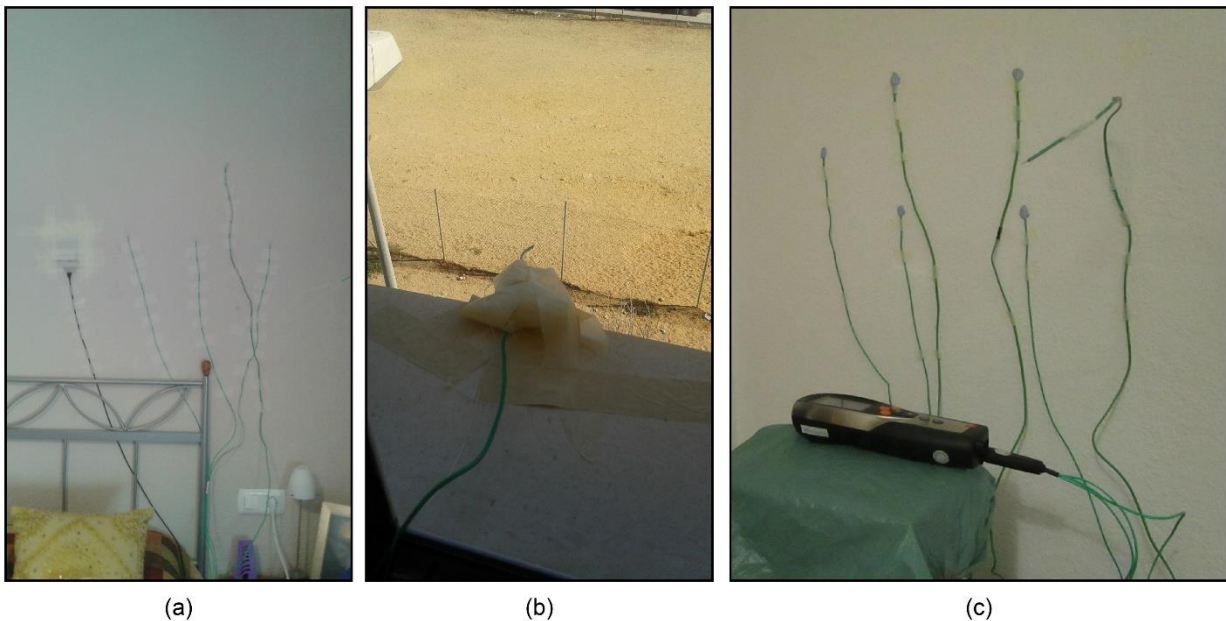


Figura 25. Ejemplos de colocación de los equipos y las sondas II: (a) alineación de las sondas de temperatura superficial; (b) colocación de la sonda de temperatura exterior; y (c) colocación del gestor de datos TESTO 435-2. Fuente: propia.

Los ensayos se realizaron en las diferentes estaciones del año. La duración de cada ensayo osciló entre 72 y 168 horas, dependiendo de varios factores, tales como la posibilidad de tener colocados los equipos o la posible incidencia de agentes meteorológicos (p. ej., previsión de lluvias durante los ensayos).

6.1.2.2. Campaña 2

La campaña 2 consistió en la aplicación de los planteamientos de termografía infrarroja para la caracterización de la transmitancia térmica en 3 cerramientos. Cada uno de estos cerramientos pertenecía a los diversos períodos constructivos considerados (véase Tabla 21): caso de estudio A (período constructivo 1), caso de estudio B (período constructivo 2) y caso de estudio C (período constructivo 3).

Los ensayos se dividieron en dos tipologías de monitorizaciones en función del planteamiento de termografía infrarroja: exterior e interior (véase Figura 26). Por cada uno de estos planteamientos, se realizaron 4 ensayos en cada muro. Así pues, en cada muro se obtuvo un total de 8 ensayos. Los ensayos tuvieron una duración de 2 horas y media y se ejecutaron en días sucesivos. Otros aspectos convenientes que destacar de los ensayos son los siguientes:

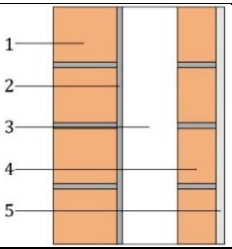
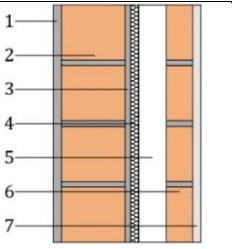
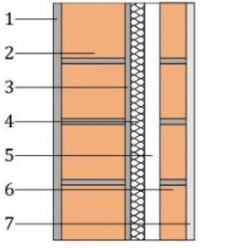
#	Caso de estudio	Espesor [mm]	Conductividad térmica [W/(m·K)]	Resistencia térmica [(m ² ·K)/W]	Boceto
A (1966)					
1	Ladrillo perforado	115	0,35	-	
2	Enfoscado	10	1,30	-	
3	Cámara de aire	100	-	0,18	
4	Ladrillo hueco	70	0,32	-	
5	Enlucido de yeso	15	0,57	-	
				$U = 1,10$ [W/(m ² ·K)]	
B (2005)					
1	Revestimiento exterior	15	1,30	-	
2	Ladrillo perforado	115	0,35	-	
3	Enfoscado	10	1,30	-	
4	Aislamiento PUR	15	0,035	-	
5	Cámara de aire	50	-	0,18	
6	Ladrillo hueco	50	0,32	-	
7	Enlucido de yeso	15	0,57	-	
				$U = 0,79$ [W/(m ² ·K)]	
C (2017)					
1	Revestimiento exterior	15	1,30	-	
2	Ladrillo perforado	117	0,35	-	
3	Enfoscado	10	1,30	-	
4	Aislamiento PUR	25	0,028	-	
5	Cámara de aire	28	-	0,18	
6	Ladrillo hueco	50	0,32	-	
7	Enlucido de yeso	15	0,57	-	
				$U = 0,58$ [W/(m ² ·K)]	

Tabla 21. Propiedades termofísicas de los cerramientos de la campaña 2. Fuente: propia.

- Los ensayos se aplicaron en instantes sin precipitaciones, tanto en el momento de medición como en las 48 horas anteriores.
- La velocidad del viento durante los ensayos fue en todo momento inferior a 1 m/s.
- Los ensayos se hicieron en condiciones casi constantes, por lo que no resultó necesario analizar parámetros térmicos dinámicos en estos casos. Para garantizar esta característica, los ensayos se realizaron en invierno, entre las horas previas y posteriores al amanecer. Asimismo, en todas las monitorizaciones se garantizó una diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior de entre 10 °C y 15 °C mediante sistemas de calefacción.

Para los ensayos se empleó la relación de equipos indicados en la Tabla 20. De esta relación de equipos, cabe destacar que la cámara termográfica usada en la campaña 1 no se utilizó en la campaña 2. Esta decisión se basó en que la cámara Fluke tiene unas características técnicas que desaconsejan su aplicación en los ensayos experimentales de caracterización de la transmitancia térmica. En la Tabla 22 se indican los equipos adicionales que se emplearon en esta campaña.

Todas las sondas se colocaron a 1,5 m de altura sobre el suelo. Asimismo, los sensores de temperatura de aire exterior se instalaron lo más alineados posible al de temperatura interior y

separado 20 cm de la cara exterior del cerramiento (Meng et al., 2015). Por su parte, el anemómetro de hilo caliente se colocó con una separación perpendicular de 10 cm de la fachada (Albatici et al., 2015; Iole Nardi et al., 2016).



Figura 26. Ejemplos de las monitorizaciones exterior e interior realizadas durante la campaña 2. Fuente: propia.

Equipo	Variable	Rango de medida	Resolución	Exactitud
Cámara termográfica FLIR E60bx	FOV Rango espectral Sensibilidad térmica	25°x19° 7,5-13 μm <0,05-30 °C		
Anemómetro de hilo caliente PCE-423	Velocidad viento	del 0-25 m/s	0,01 m/s	$\pm 5 \%$

Tabla 22. Relación de los equipos específicos utilizados en la campaña 2. Fuente: propia.

La cámara termográfica se ubicó en un trípode, a una distancia perpendicular de 1,5 m de la fachada y con un ángulo de inclinación de 20° para evitar reflexiones en la fachada (Tejedor et al., 2017). Para medir la temperatura reflejada, se utilizó una lámina reflectora colocada en el área de medición.

Previo al inicio de los ensayos, la emisividad de los cerramientos se determinó mediante una cinta adhesiva certificada según la ASTM E1933-14 (ASTM International, 2014b). Añadir que

únicamente se determinó al principio de cada ensayo, ya que se trata de un valor fijo que no presenta variaciones debido a las oscilaciones comunes de la temperatura ambiental en el que se desempeñan los edificios (Maroy et al., 2017).

6.2. Proceso 2. Simulaciones

Tal y como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos de la investigación era la disposición de nuevos procedimientos de determinación de la transmitancia térmica que aborden las limitaciones existentes en los métodos actuales. Para ello, y tal como se explica en el subapartado 6.3., se emplearon algoritmos de aprendizaje automático para generar modelos estimadores. Uno de los requisitos fundamentales para la correcta aplicación de estos algoritmos es disponer de un gran conjunto de datos que garantice el correcto aprendizaje de los modelos. Dado que el esfuerzo temporal que puede suponer la realización de una muestra amplia de ensayos puede limitar la utilización de un planteamiento de estas características, se diseñaron simulaciones transitorias bidimensionales para la generación de los conjuntos de datos necesarios. Estas simulaciones se hicieron con el software HTFlux.

Las simulaciones se basaron en una combinación de ensayos reales con modelos de fachada simulados (véase Figura 27). Para ello, se modelaron 140 tipologías diferentes de fachadas. El diseño de estas tipologías se basó tanto en los cerramientos incluidos en el Catálogo de Elementos Constructivos (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2010) como en los precedentes de diversos estudios de catalogación de las fachadas del parque inmobiliario español (Domínguez-Amarillo, Sendra, & Oteiza, 2016; Kurtz et al., 2015). Por lo tanto, los modelos diseñados corresponden a tipologías de fachadas de los períodos constructivos característicos del parque inmobiliario español. En el caso de los cerramientos construidos en los períodos constructivos 2 y 3, los materiales aislantes fueron varios, entre los que destacan el poliestireno expandido, la lana mineral, el poliuretano y el poliestireno extruido. Estos materiales se seleccionaron al tratarse de las tipologías de aislamientos más comunes en los diseños de los edificios (Schiavoni, D'Alessandro, Bianchi, & Asdrubali, 2016). El hecho de que los muros fueran diseñados en el proceso de simulación permitió que se dispusiera de un conocimiento exacto de sus capas (es decir, del tipo de material, de espesor y de las propiedades térmicas de cada capa). Por consiguiente, se pudo disponer de un conjunto de datos con conocimientos precisos de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 de cada fachada simulada.

Cada una de estas 140 tipologías de fachadas se combinó con un conjunto de 163 series de tiempo de temperatura de aire interior y exterior que se obtuvieron en la campaña 1. Por lo tanto, se consiguió un total de 22820 combinaciones diferentes entre las tipologías de muros y las series de tiempo. Tal y como se ha comentado, las mediciones se llevaron a cabo en diversas condiciones de ensayo. Así pues, existieron monitorizaciones tanto en condiciones favorables como desfavorables, lo cual permitió abarcar una amplia variedad de condiciones de ensayo.

En cada una de estas 22820 combinaciones se realizaron simulaciones transitorias bidimensionales para obtener las variables de temperatura superficial y de flujo de calor. Como condiciones de contorno, se usaron las resistencias térmicas superficiales establecidas en la ISO 6946:2007 para flujos horizontales de calor: 0,13 m²K/W para condiciones internas y 0,04 m²K/W para condiciones externas. Esto se debió al hecho de que la ISO 6946:2007 recomienda estos valores de resistencia térmica superficial para las envolventes de edificios típicos y ante condiciones normales de funcionamiento (es decir, con una temperatura interior dentro de unos rangos aceptables de confort térmico). Asimismo, conviene destacar que estos valores de resistencia térmica superficial se han utilizado en otros estudios de investigación similares sobre caracterización térmica a través de simulaciones transitorias (Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Sánchez-García, & Moyano, 2019; Evangelisti et al., 2018).

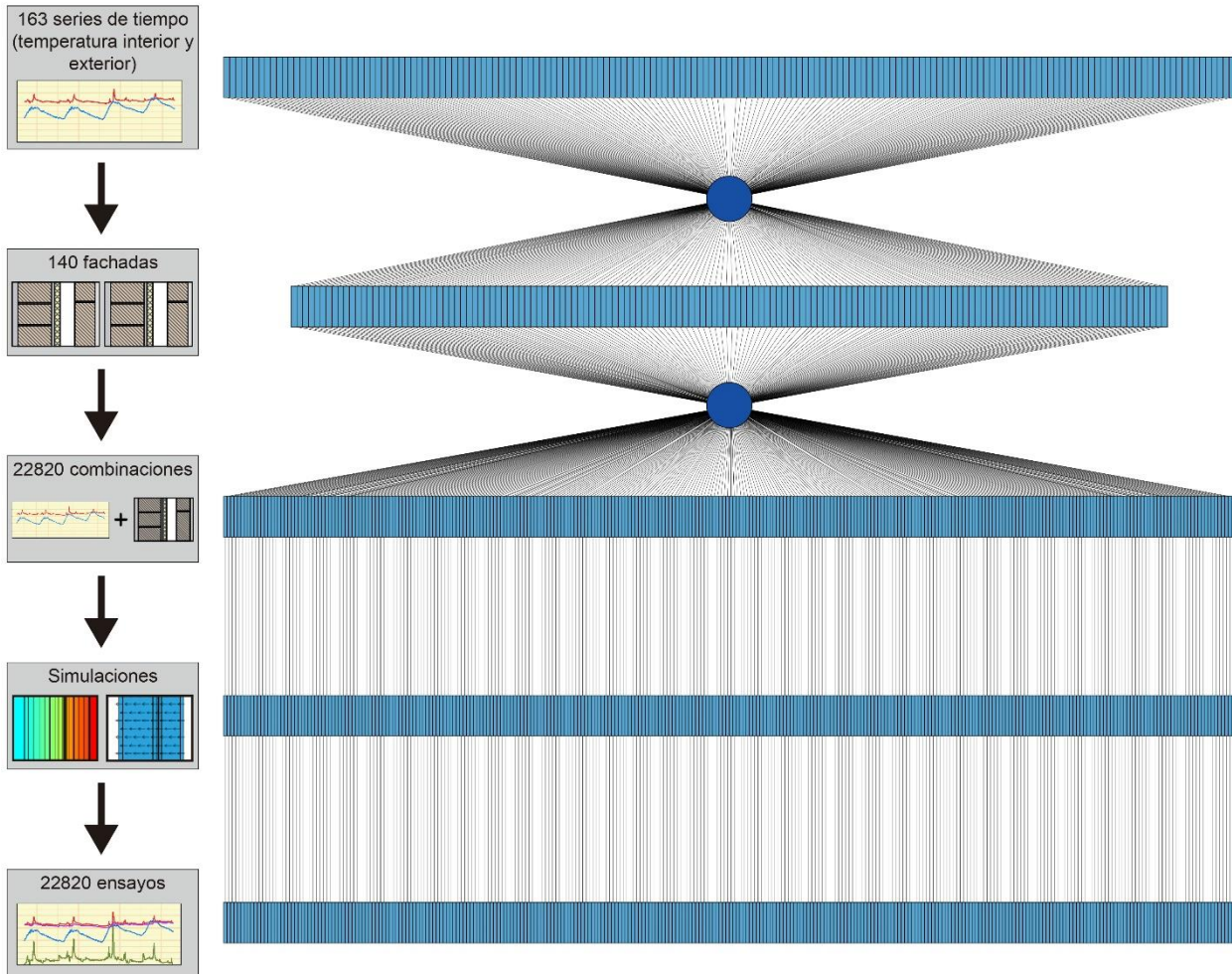


Figura 27. Flujo de trabajo del proceso de simulación realizado en la investigación. Fuente: propia.

Tal y como se ha indicado anteriormente, la duración de las monitorizaciones de la campaña 1 osciló entre 3 y 7 días. Por lo tanto, la duración que correspondiera a cada serie de tiempo se consideró como tiempo de simulación. Otros aspectos concernientes al proceso de simulación tuvieron que ver con el tiempo de adquisición de datos y con la localización de la sonda de la temperatura superficial y del flujo de calor. Por una parte, se aplicaron intervalos de 15 minutos, los cuales coinciden con los empleados en la medición de las temperaturas de aire interior y exterior. Por otra parte, las variables medidas se localizaron a una altura de 1,50 m del suelo para evitar efectos bidimensionales en el flujo de calor por la unión con el forjado. Este criterio va en consonancia con los criterios operativos recogidos en las investigaciones existentes de los métodos de transmitancia térmica.

Asimismo, se disponía de las mediciones de las variables de temperatura superficial y de flujo de calor de 163 ensayos reales, las cuales se utilizaron para validar los datos simulados y, de esta manera, garantizar la representatividad de los datos usados. En este sentido, en la Figura 28 se representan las nubes de puntos entre los valores simulados y los reales. En los dos casos se puede apreciar que existe un grado de aproximación adecuado entre los valores reales y los simulados. En relación con esto, el error medio absoluto fue de 0,14 °C para la temperatura superficial interior y de 0,23 W/m² para el flujo de calor. Esto garantizó que los valores simulados son próximos a los que pudieran ser obtenidos en condiciones reales y permita garantizar como los resultados de los ensayos simulados son asimilables a unos ensayos reales realizados en las mismas condiciones.

Al finalizar el proceso de simulación, se dispuso de un total de 22820 ensayos diferentes. En la Figura 29 se representan varios ejemplos de los datos obtenidos. A su vez, el uso de estos ensayos en los distintos planteamientos de aprendizaje automático varió en función de las necesidades del estudio. Por este motivo, en los subapartados del Apartado 7, que corresponden a las investigaciones de aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, se realizará una descripción de las variables consideradas en cada planteamiento y de su forma de agrupamiento.

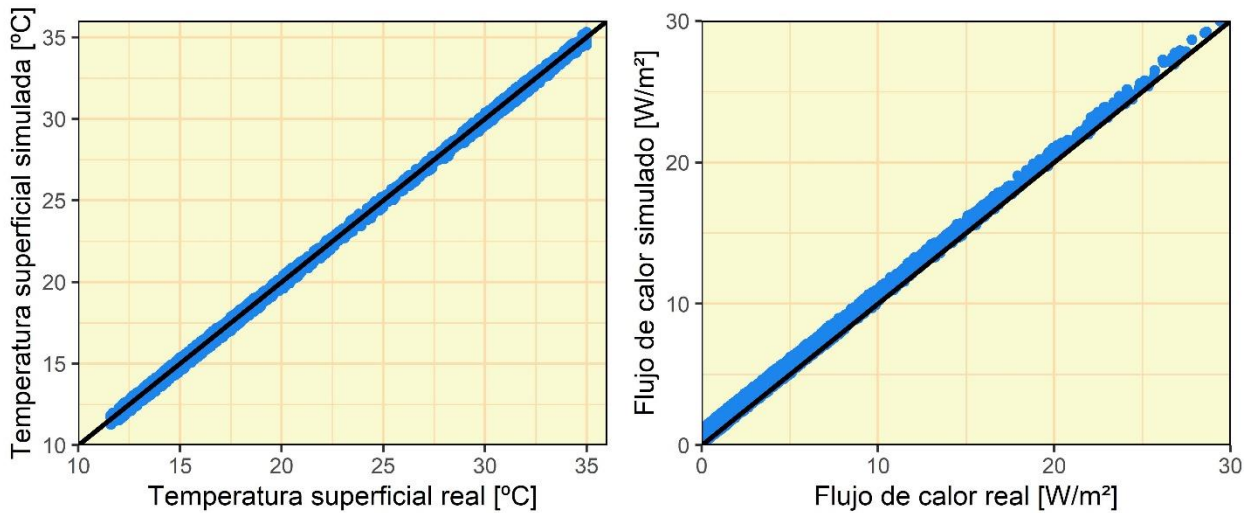


Figura 28. Nubes de puntos con el ajuste entre los valores simulados y los reales de las variables de temperatura superficial y de flujo de calor. Fuente: propia.

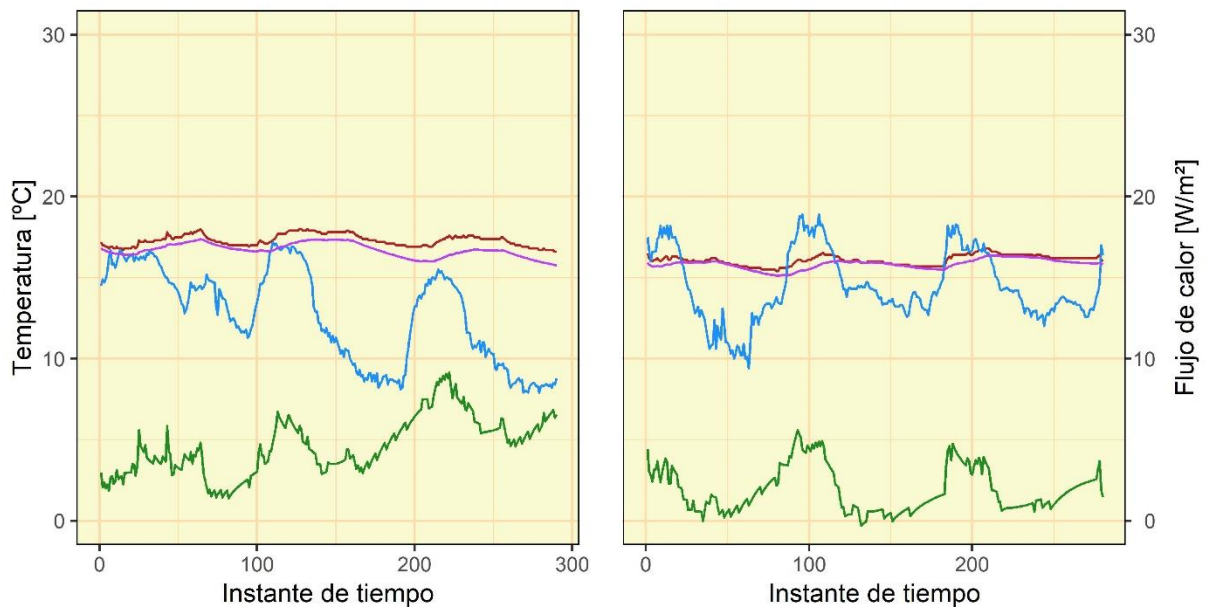


Figura 29. Ejemplo de varias series de tiempo simuladas. En los gráficos se representa la temperatura del aire interior (en color rojo), la temperatura del aire exterior (en color azul), la temperatura superficial interior (en color lila) y el flujo de calor (en color verde). Fuente: propia.

6.3. Proceso 3. Análisis de datos

6.3.1. Subproceso 3.1.: Análisis de los resultados de las campañas experimentales y de las correlaciones experimentales del término convectivo utilizadas

6.3.1.1. Análisis de los resultados de las campañas experimentales

Los datos obtenidos de las campañas experimentales se analizaron en el entorno de programación estadístico R (Ihaka & Gentleman, 1996), cuyo empleo se complementó con otras 3 herramientas auxiliares que permitieron la exportación y la obtención de datos de los equipos de medición:

- TESTO Comfort Software Básico, utilizado para la exportación de los datos registrados por el equipo TESTO 435-2.
- ALMEMO Control, con el que se exportan los datos registrados por el equipo ALMEMO 2590-4AS.
- FLIR Tools, para llevar a cabo el procesado de los termogramas realizados.

Los datos obtenidos se analizaron conforme a las diferentes formulaciones descritas en el Apartado 4. En la Tabla 23 se recogen las formulaciones usadas para cada método. Destacar que, en el caso del método termométrico, la consideración de una suma ponderada de las instancias o del promedio de valores instantáneos conllevó a la obtención de resultados similares. Por lo tanto, a efectos de las investigaciones, los dos planteamientos se pueden valorar como válidos.

Método	Subcategoría	Ecuación
Método teórico (ISO 6946:2007)		$U = \frac{1}{R_{s,in} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i} + R_{s,ext}} \quad (1)$
Método termoflujométrico (ISO 9869-1:2014)	Método promedio	$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})} \quad (7)$
	Método promedio con corrección por almacenamiento	$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j - \frac{(F_{in}\delta T_{in} + F_{ext}\delta T_{ext})}{\Delta t}}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})} \quad (8)$
Método termométrico		$U = \frac{\sum_{j=1}^n h_{in}(T_{in,j} - T_{s,in,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ext,j})} \quad (19)$
Método de termografía infrarroja cuantitativa	Madding	$U = \frac{4\varepsilon\sigma \left(\frac{T_{s,in} + T_{refl}}{2}\right)^3 (T_{s,in} - T_{refl}) + h_{in}(T_{s,in} - T_{in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (20)$
	Fokaides y Kalogirou	$U = \frac{4\varepsilon\sigma T_{s,in}^3 (T_{s,in} - T_{refl}) + h_{in}(T_{s,in} - T_{in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (21)$
	Albatici et al.	$U = \frac{\varepsilon\sigma (T_{s,ext}^4 - T_{ext}^4) + 3,8054v(T_{s,ext} - T_{ext})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (22)$
	Dall'O et al.	$U = \frac{(5,8 + 3,8054v)(T_{s,ext} - T_{ext})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (23)$
	Tejedor et al.	$U = \frac{\varepsilon\sigma (T_{refl}^4 - T_{s,in}^4) + \frac{k \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2}{L} (T_{in} - T_{s,in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (24)$
		$U = \frac{\varepsilon\sigma (T_{refl}^4 - T_{s,in}^4) + \frac{k \cdot \{0,825 + 0,325 \cdot Ra^{1/6}\}^2}{L} \cdot (T_{in} - T_{s,in})}{T_{in} - T_{ext}} \quad (25)$

Tabla 23. Resumen de las expresiones utilizadas para los diferentes planteamientos de caracterización de la transmitancia térmica. Fuente: propia.

En este punto, cabe señalar la importancia del filtrado de datos para aumentar la representatividad de los resultados. En este sentido, en los resultados del método termométrico se aplicaron filtros a las instancias de los conjuntos de datos obtenidos de las monitorizaciones. Este filtrado estuvo orientado a considerar únicamente aquellas instancias con un gradiente térmico elevado (superior a 5 °C) entre los ambientes interior y exterior, con velocidades de viento inferior a 1 m/s y sin precipitaciones.

Para garantizar la representatividad de los resultados, se emplearon valores de referencia de los resultados de transmitancia térmica obtenidos. Siguiendo el criterio de la ISO 9869-1:2014, se valoraron como resultados válidos aquellos que presentaron una desviación porcentual inferior al 20 % entre el valor de referencia y el valor obtenido experimentalmente (véase Ecuación (26)). El valor de referencia varió en función de la investigación: (i) el valor teórico-estimativo de la ISO 6946:2007; y (ii) el valor de la ISO 9869-1:2014. La utilización de ambos como valor de referencia está justificado desde el punto de vista de la ISO 9869-1:2014 y de la amplia variedad de investigaciones que los emplean. Por lo tanto, las variaciones que presenta el valor usado como valor de referencia se deben, en muchos casos, a los comentarios que se recibieron durante el proceso de revisión de las publicaciones.

$$\sigma = \frac{U_{\text{Medido}} - U_{\text{Referencia}}}{U_{\text{Referencia}}} \quad (26)$$

Por su parte, la incertidumbre asociada a los resultados experimentales se estima a través de la incertidumbre estándar combinada. Las contribuciones de incertidumbre vinculadas a la medición se debieron a la exactitud de los equipos colocados (indicadas en las especificaciones técnicas de los fabricantes), así como a cuestiones operativas relacionadas con la realización del ensayo y con las condiciones ambientales (véase Tabla 24). Estos valores se obtuvieron a partir de las estimaciones porcentuales de error reflejadas en diferentes investigaciones, las cuales se han descrito en el Apartado 4.

Tipo	Descripción	Estimación
Equipos y proceso de medición	No uniformidad de la temperatura debido a la presencia de heterogeneidades en el cerramiento o a la incidencia de radiación interna/externa	1–5 %
	Mal contacto de los termopares con la superficie	1–5 %
	Colocación de los termopares de superficie próximo a las juntas de las piezas de las capas	2–6 %
	Linealidad y sensibilidad del termopar	0,1–0,2 °C
	Resolución del convertidor A/D y transmisión de datos	1–2 %
	Ambiental	Inestabilidad de la temperatura debido a las variaciones climáticas ambientales
Ambiental	Influencia de la radiación externa e interna proveniente del sol o de los equipos de iluminación	1–2 %
	Influencia de ráfagas de viento de velocidad elevada	1–2 %
	Influencia de la humedad de condensación en las medidas	1–2 %

Tabla 24. Contribuciones de incertidumbre estimadas para los resultados obtenidos a través de los métodos experimentales. Fuente: propia.

Para estimar la incertidumbre estándar combinada, se utiliza la norma ISO/IEC Guide 98-3:2008 (International Organization for Standardization, 2008). De acuerdo con dicha norma, la incertidumbre para magnitudes no correlacionadas, como es el caso de los métodos experimentales, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta f}{\delta x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (27)$$

Donde $\left(\frac{\delta f}{\delta x_i}\right)$ son los coeficientes de sensibilidad y $u(x_i)$ son las contribuciones de incertidumbre.

Las contribuciones de incertidumbre irán dirigidas a las variables medibles. Así pues, en el caso del THM, se establecen contribuciones de incertidumbre para las variables de temperaturas (T_{in} , T_{ext} y $T_{s,in}$), mientras que el valor del coeficiente de transferencia de calor total interior, al ser un parámetro fijo y no medido, no tiene fuentes de incertidumbre asociadas.

6.3.1.2. Correlaciones experimentales del término convectivo

Tal y como se ha indicado anteriormente, uno de los objetivos de esta tesis era el análisis y la determinación de la correlación de convección que mejor se ajustaba a los planteamientos de termografía infrarroja, ya que existe una amplia variedad de expresiones para el término convectivo, debidas tanto a correlaciones experimentales con alguna variable determinada como a números adimensionales. Las investigaciones existentes en relación con los métodos cuantitativos mediante termografía infrarroja usan algunas de estas expresiones sin ningún tipo de justificación. Así pues, en los análisis realizados con termografía infrarroja se han considerado las correlaciones indicadas en los dos próximos subapartados. Las expresiones concernientes al coeficiente de transferencia de calor convectivo externo (h_{ext}) se aplicaron en la Ecuación 28, mientras que las expresiones concernientes al coeficiente de transferencia de calor convectivo interno (h_i) se aplicaron en la Ecuación 29.

$$U = \frac{h_{ext}(T_{s,ext} - T_{ext}) + \varepsilon\sigma(T_{s,ext}^4 - T_{ext}^4)}{T_{in} - T_{ext}} \quad (28)$$

$$U = \frac{h_{in} \cdot (T_{in} - T_{s,in}) + \varepsilon\sigma(T_{refl}^4 - T_{s,in}^4)}{T_{in} - T_{ext}} \quad (29)$$

6.3.1.2.1. Correlaciones experimentales del término convectivo externo

El empleo del conjunto de ecuaciones de Jürges se basa en realizar ajustes en el coeficiente de transferencia de calor convectivo externo para una placa de cobre calentada en un túnel de viento (Hagishima, Tanimoto, & Narita, 2005). Sin embargo, Cole y Sturrock (1977) señalaron varios problemas con los resultados de los experimentos de túnel de viento, por lo que el coeficiente de transferencia de calor convectivo externo medido de una placa plana pequeña presenta inconvenientes al aplicarlo a superficies de construcción a gran escala (Hagishima et al., 2005). Por otro lado, Watmuff et al. (1977) indicaron que la correlación para la convección indicada por Jürges tiene un componente de radiación, por lo que su utilización en la formulación propuesta por Albatici y Tonelli puede incrementar todavía más la predominancia de la componente de radiación. Además, la dependencia del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo con la velocidad del viento depende de la posición de la medición y del tamaño del muro (Hagishima et al., 2005).

Por este motivo, el uso de un único valor para el coeficiente de transferencia de calor convectivo externo debido a una correlación con el viento puede presentar dificultades para ser aplicado en diferentes casos de estudio, ya sea por la altura del cerramiento, por la proximidad a esquinas, etc. En la literatura científica existen multitud de expresiones de correlación, algunas de ellas recopiladas por diversos autores (Defraeye, Blocken, & Carmeliet, 2011; Hagishima et al., 2005; Palyvos, 2008).

Al analizar estas investigaciones, se deben tener en cuenta algunos aspectos cuando se comparan las ecuaciones de correlación propuestas en los resultados. Por un lado, la altura en la que se mide la velocidad del viento es diferente según la publicación (p. ej., la velocidad del viento en cubierta, la velocidad del viento local o la velocidad del viento en campo libre). Por otro lado, no se suele indicar la distancia perpendicular de separación a la que se mide el viento con respecto a las superficies verticales. Por esta razón, podría ser difícil aplicar las ecuaciones utilizadas en estos experimentos, ya que un patrón de flujo del viento alrededor de un edificio fluctúa considerablemente, lo que significa que el perfil del viento es altamente dependiente de la distancia desde la envolvente del edificio. Asimismo, otros aspectos, como las diferencias existentes en el término convectivo entre el punto medio y el borde de una superficie vertical (Hagishima et al., 2005), no se reflejan en la mayor parte de estas investigaciones.

En la Tabla 25 se incluye una relación de las diversas correlaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo debidas a la velocidad del viento local empleadas en la investigación. Estas correlaciones hacen distinciones en función del tipo de rugosidad de la superficie vertical, de la dirección del viento e, incluso, de la velocidad del viento. La gran mayoría de estas distinciones se realizan para expresiones incluidas en la misma investigación.

Expresión	Comentarios	Referencia
$h_{ext} = 5,8 + 3,95v$	(30) $v < 5m/s$	Nusselt y Jürges (1922)
$h_{ext} = 7,31v^{0,78}$	(31) $5 < v < 24m/s$	Nusselt y Jürges (1922)
$h_{ext} = 7,11v^{0,775}$	(32) Superficies suaves, $5 < v < 24m/s$	Jürges (1924)
$h_{ext} = 7,52v^{0,784}$	(33) Superficies rugosas, $5 < v < 24m/s$	Jürges (1924)
$h_{ext} = 5,7 + 3,8v$	(34) Superficies suaves, $v < 5m/s$	McAdams (1954)
$h_{ext} = 7,2v^{0,78}$	(35) Superficies suaves, $v > 5m/s$	McAdams (1954)
$h_{ext} = 7,6v^{0,78}$	(36) Superficies rugosas, $v > 5m/s$	McAdams (1954)
$h_{ext} = 6,2 + 4,3v$	(37) Superficies rugosas, $v > 5m/s$	Davies (2004)
$h_{ext} = 6,97v^{0,666}$	(38) -	Sogin (1964)
$h_{ext} = 6,05 + 4,08v$	(39) Superficies rugosas, $v \leq 5m/s$	Schaak (1965)
$h_{ext} = 7,82 + 3,50v$	(40) Superficies suaves, sin velocidad límite	Jennings (1970)
$h_{ext} = 10,7 + 4,96v$	(41) Ladrillo liso, sin velocidad límite	Jennings (1970)
$h_{ext} = 5,7 + 6v$	(42) Calefacción	Sturrock (1971)
$h_{ext} = 6,60v^{0,6}$	(43) -	Mitchell (1971)
$h_{ext} = 18,65v^{0,605}$	(44) -	Lokmanhekim (1971)
$h_{ext} = 5,8 + 2,9v$	(45) Barlovento	Ito (1972)
$h_{ext} = 8,7 + 9,4v$	(46) Sotavento, $v > 4m/s$	Ito (1972)
$h_{ext} = 11,4 + 5,7v$	(47) Calefacción, superficie normal, $v < 5m/s$	Cole y Sturrock (1977)
$h_{ext} = 5,7v$	(48) calefacción, superficie sotavento, $v < 5m/s$	Cole y Sturrock (1977)
$h_{ext} = 2,8 + 3,0v$	(49) Corrección de la Ecuación (30), $v < 5m/s$	Watmuff et al. (1977)
$h_{ext} = 4,7 + 7,6v$	(50) -	Kimura (1977)
$h_{ext} = 7,55 + 4,35v$	(51) -	Nicol (1977)
$h_{ext} = 4,5 + 2,9v$	(52) Superficies suaves	Lunde (1980)
$h_{ext} = 8,55 + 2,56v$	(53) -	Test et al. (1981)
$h_{ext} = 5,1 + 1,7v$	(54) $0,5 < v < 20m/s$	Sharples (1984)
$h_{ext} = 6,47 + 6,806v$	(55) -	Yazdanian y Klems (1993)
$h_{ext} = 2,38v^{0,89}$	(56) Convección forzada, barlovento	Yazdanian y Klems (1993)
$h_{ext} = 2,86v^{0,617}$	(57) Convección forzada, sotavento	Yazdanian y Klems (1993)
$h_{ext} = 4,955 + 1,444v$	(58) -	Jayamaha et al. (1996)
$h_{ext} = 8,91 + 2,00v$	(59) Barlovento	Loveday y Taki (1996)
$h_{ext} = 4,93 + 1,77v$	(60) Sotavento	Loveday y Taki (1996)
$h_{ext} = 16,15v^{0,397}$	(61) Barlovento, $0,5 < v < 9m/s$	Loveday y Taki (1996)
$h_{ext} = 16,25v^{0,503}$	(62) Sotavento, $0,5 < v < 9m/s$	Loveday y Taki (1996)
$h_{ext} = 16,21v^{0,452}$	(63) Barlovento y sotavento	Loveday y Taki (1996)
$h_{ext} = 14,82v^{0,42}$	(64) Barlovento, $0 < v < 10m/s$	Taki y Loveday (1996)

Tabla 25. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo debido a correlaciones con la velocidad del viento. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Bermúdez, Moyano, et al. (2019b)).

Expresión	Comentarios	Referencia
$h_{ext} = 15,06v^{0,53}$	(65) Sotavento, $0 < v < 4,5m/s$	Taki y Loveday (1996)
$h_{ext} = 4,47 + 10,21v$	(66) $0,5 < v < 3m/s$	Hagishima y Tanimoto (2003)
$h_{ext} = 4 + 4v$	(67) -	ISO 6946:2007
$h_{ext} = 7,4 + 3,8v$	(68) Superficies rugosas, $v < 15m/s$	Mirsadeghi et al. (2013)
$h_{ext} = 6,5 + 3,6v$	(69) Superficies suaves, $v < 15m/s$	Mirsadeghi et al. (2013)
$h_{ext} = 16,7v^{0,5}$	(70) -	Mirsadeghi et al. (2013)
$h_{ext} = 5,8 + 4,1v$	(71) -	CIBSE (2015)
$h_{ext} = 3,32 + 6,31v$	(72) Barlovento, $0 < v < 3,5m/s$	Liu y Harris (2015)
$h_{ext} = 3,19 + 5,03v$	(73) Sotavento, $0 < v < 3,5m/s$	Liu y Harris (2015)
$h_{ext} = 5,56 + 4,48v$	(74) Superficies rugosas, $v < 5m/s$	Xie et al. (2018)

Tabla 25 (continuación). Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo debido a correlaciones con la velocidad del viento. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Bermúdez, Moyano, et al. (2019b)).

Expresión	Comentarios	Referencia
$h_{ext} = \frac{k(0,10Re^{0,666})}{L}$	(75) Barlovento	Nusselt y Jürges (1922)
$h_{ext} = \frac{k(0,20Re^{0,666})}{L}$	(76) Sotavento	Nusselt y Jürges (1922)
$h_{ext} = \frac{k(0,42Re^{0,6})}{L}$	(77) -	Jürges (1924)
$h_{ext} = \frac{k(0,931Re^{0,5}Pr^{0,333})}{L}$	(78) -	Jürges (1924)
$h_{ext} = \frac{k(0,93Re^{0,5}Pr^{0,333})}{L}$	(79) -	McAdams (1954)
$h_{ext} = \frac{k(0,86Re^{0,5}Pr^{0,333})}{L}$	(80) -	McAdams (1954)
$h_{ext} = \frac{k(0,0253Re^{0,8} + 3)}{L}$	(81) -	McAdams (1954)
$h_{ext} = \frac{k(0,664Re^{0,5}Pr^{0,33})}{L}$	(82) Flujo laminar	Davies (2004)
$h_{ext} = \frac{k(0,037Re^{0,8}Pr^{0,33})}{L}$	(83) Flujo turbulento	Sogin (1964)

Tabla 26. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo debido a correlaciones con números adimensionales. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Bermúdez, Moyano, et al. (2019b)).

6.3.1.2.2. Correlaciones experimentales del término convectivo interno

Al igual que con el término convectivo externo, para el término convectivo interno existe una amplia variedad de expresiones. Las investigaciones de aplicación de la termografía infrarroja cuantitativa desde el interior se han caracterizado por emplear una mayor variedad de expresiones para el coeficiente de transferencia convectiva interna. En este sentido, mientras que los planteamientos desde el exterior solo han empleado la correlación de Jürges publicada por Watanabe (1965), en los planteamientos de interior se llegan a usar hasta 6 expresiones diferentes, que van desde la utilización de correlaciones experimentales hasta la asignación de valores teóricos.

Sin embargo, con esta variedad de expresiones usadas por los autores en sus investigaciones no ha sido posible abarcar las opciones de expresiones existentes. En la literatura científica existen muchas expresiones de correlación experimental debidas a diferencias de temperatura, algunas de ellas recopiladas en varios artículos de revisión (A. J. N. Khalifa, 2001a, 2001b; Obyn & Van Moeseke, 2015; Peeters, Beausoleil-Morrison, & Novoselac, 2011).

En la Tabla 27 se incluye una relación de las correlaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo interno debidas a diferencias de temperaturas analizadas en la investigación. El enfoque empleado para cada correlación varía según la investigación, existiendo correlaciones determinadas según la similitud que tiene la transferencia de calor por convección de una superficie vertical de una habitación con la de una placa plana aislada o según los experimentos realizados en espacios cerrados con determinados sistemas de climatización.

Expresión ¹⁰		Comentarios	Referencia
$h_{in} = 3,05 \cdot (\Delta T_{si})^{0,12}$	(84)		Wilkes y Peterson (1938)
$h_{in} = 2,5 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(85)	Citado del trabajo de Hottinger (1938)	Giesecke (1940)
$h_{in} = 1,368 \cdot \left(\frac{\Delta T_{si}}{L}\right)^{0,25}$	(86)	Régimen de flujo laminar	Min et al. (1956)
$h_{in} = 1,973 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(87)	Régimen de flujo turbulento	Min et al. (1956)
$h_{in} = 1,664 \cdot (\Delta T_{si})^{0,27}$	(88)	Citado del trabajo de Carroll (1948)	Min et al. (1956)
$h_{in} = 1,776 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(89)	Citado del trabajo de McAdams (1954)	Min et al. (1956)
$h_{in} = 1,517 \cdot (\Delta T_{si})^{0,33}$	(90)	Citado del trabajo de King (1932)	Min et al. (1956)
$h_{in} = \frac{0,0257}{L} \cdot (0,825 + 7,01 \cdot (\Delta T_{si})^{1/6} \cdot L^{3/6})^2$	(91)		Churchill y Chu (1975)
$h_{in} = (0,134 \cdot (L)^{-0,5} + 1,11 \cdot (\Delta T_{si})^{0,17})^2$	(92)	Simplificación de la correlación de Churchill y Chu	ESDU (1979)
$h_{in} = \left\{ \left[1,5 \cdot \left(\frac{\Delta T_{si}}{L}\right)^{1/4} \right]^6 + [1,23 \cdot (\Delta T_{si})^{1/3}]^6 \right\}^{1/6}$	(93)		Alamdari y Hammond (1983)
$h_i = 1,31 \cdot \left(\frac{\Delta T_{si}}{L}\right)^{0,33}$	(94)	Régimen de flujo laminar	Earle (1983)
$h_i = 1,8 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(95)	Régimen de flujo turbulento	Earle (1983)
$h_{in} = 3,08 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(96)		Li et al. (1983)
$h_{in} = 2,88 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(97)		Li et al. (1983)
$h_i = 1,42 \cdot \left(\frac{\Delta T_{si}}{L}\right)^{0,25}$	(98)	Régimen de flujo laminar	Holman (1986)
$h_i = 1,31 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(99)	Régimen de flujo turbulento	Holman (1986)
$h_{in} = 1,98 \cdot (\Delta T_{si})^{0,32}$	(100)	Muro con un radiador cerca	Khalifa y Marshall (1990)
$h_{in} = 2,3 \cdot (\Delta T_{si})^{0,24}$	(101)	Muro con un radiador debajo de la ventana	Khalifa y Marshall (1990)
$h_{in} = 2,92 \cdot (\Delta T_{si})^{0,25}$	(102)	Muro enfrente de un radiador	Khalifa y Marshall (1990)
$h_{in} = 2,03 \cdot (\Delta T_{si})^{0,14}$	(103)	Muro de gran superficie con aislamiento	Khalifa y Marshall (1990)
$h_{in} = 1,57 \cdot (\Delta T_{si})^{0,31}$	(104)		Hatton y Awbi (1995)
$h_{in} = \frac{1,823}{L^{0,121}} \cdot (\Delta T_{si})^{0,293}$	(105)		Awbi y Hatton (1999)
$h_{in} = 1,332 \cdot \left(\frac{\Delta T_{si}}{L}\right)^{1/4}$	(106)	Régimen de flujo laminar	Fohanno y Polidori (2006)

Tabla 27. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo interno debido a correlaciones con diferencias de temperaturas. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Bermúdez, Moyano, et al. (2019a)).

Es conveniente destacar que estas correlaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo interno no tienen en cuenta el efecto que los elementos de flanco generan a la superficie vertical, a los huecos o a la propia habitación (Obyn & Van Moeseke, 2015). Por consiguiente, la utilización de una correlación fija para todos los casos de estudio del

¹⁰ Para simplificar la lectura de la tabla se utiliza la variable ΔT_{si} . Esta variable hace referencia a la diferencia entre la temperatura superficial interior y la temperatura interior.

coeficiente de transferencia de calor convectivo interno podría provocar variaciones en los resultados de transmitancia térmica.

Con respecto a las correlaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo interno empleando números adimensionales, existe una amplia variedad de correlaciones al margen de la propuesta por Churchill y Chu, utilizada en las investigaciones de Tejedor et al. (2017, 2018). Así pues, en la Tabla 28 se incluyen las correlaciones seleccionadas para este estudio por su idoneidad para su aplicación en fachadas.

Expresión	Comentarios	Referencia
$h_{in} = k \cdot \frac{0,555 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(107) $10^3 < Ra < 10^8$	Jakob (1949)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,129 \cdot (Ra)^{0,33}}{L}$	(108) $10^8 < Ra < 10^{12}$	Jakob (1949)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,56 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(109) Régimen de flujo laminar	Fishenden y Saunders (1950)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,12 \cdot (Ra)^{0,33}}{L}$	(110) Régimen de flujo turbulento	Fishenden y Saunders (1950)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,548 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(111) Régimen de flujo laminar	McAdams (1954)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,52 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(112) $Ra < 3 \cdot 10^8$	McAdams (1954)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,59 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(113) $10^4 < Ra < 10^9$	McAdams (1954)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,13 \cdot (Ra)^{0,33}}{L}$	(114) $2 \cdot 10^9 < Ra < 10^{12}$	McAdams (1954)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,48 \cdot (Gr)^{0,25}}{L}$	(115) Régimen de flujo laminar	CIBSE (1976)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,119 \cdot (Gr)^{0,33}}{L}$	(116) Régimen de flujo turbulento	CIBSE (1976)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,516 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(117) Régimen de flujo laminar	Wong (1977)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,021 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(118) $10^{10} < Ra < 10^{12}$	Wong (1977)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,555 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(119) Régimen de flujo laminar	Welty (1978)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,021 \cdot (Ra)^{0,40}}{L}$	(120) Régimen de flujo turbulento	Welty (1978)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,508 \cdot \frac{Pr^{0,5} \cdot Gr^{0,25}}{(0,952 + Pr)^{0,25}}}{L}$	(121) Régimen de flujo laminar	Welty (1978)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,678 \cdot \frac{Pr^{0,5} \cdot Gr^{0,25}}{(0,952 + Pr)^{0,25}}}{L}$	(122) Régimen de flujo laminar	Welty (1978)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,10 \cdot (Ra)^{0,33}}{L}$	(123)	Holman (1986)
$h_{in} = k \cdot \frac{0,54 \cdot (Ra)^{0,25}}{L}$	(124) $1,15 \cdot 10^5 < Ra < 2 \cdot 10^9$	Al-Arabi y Sakr (1988)

Tabla 28. Aproximaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo interno debido a correlaciones con números adimensionales. Fuente: propia (adaptación para esta tesis doctoral de la tabla incluida en Bienvenido-Huertas, Bermúdez, Moyano, et al. (2019a)).

6.3.2. Subproceso 3.2.: Análisis mediante aprendizaje automático

Varios objetivos de esta investigación plantean la optimización y la estimación de los valores relacionados con la transmitancia térmica. Para ello, en las investigaciones realizadas en el marco de esta tesis se plantea la utilización de algoritmos de aprendizaje automático que permitan la generación de modelos predictores para abordar estos problemas. Los algoritmos de aprendizaje automático seleccionados fueron las redes neuronales artificiales y los bosques aleatorios, debido a las diferencias existentes en las características de cada algoritmo y a los

buenos resultados obtenidos en diferentes investigaciones. A continuación, se realiza una descripción de los algoritmos y se indican los parámetros configurables considerados en la investigación. Una vez descritos los dos algoritmos, se procede a la descripción del procedimiento de entrenamiento y de validación de los modelos desarrollados durante las investigaciones.

6.3.2.1. Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales son un modelo estadístico que simula la estructura neurológica del cerebro para la resolución de problemas, tanto lineales como no lineales (Haykin, Haykin, Haykin, & Haykin, 2009). Una red neuronal biológica es un conjunto de neuronas interconectadas que definen un circuito. Las redes neuronales, como tipología de computación bio-inspirada, parten de la hipótesis de que resulta posible imitar ciertas partes de las neuronas, tales como los axones, el cuerpo neuronal o las dendritas (véase Figura 30 (a)), mediante la utilización de modelos estadísticos simplificados. Para ello, se basan en la forma en la que se produce la transmisión y el procesamiento de la información en una neurona biológica: las señales de entrada entran en la neurona a través de las dendritas y se envían al axón una vez que se reciben suficientes señales para dar una señal de salida que puede ir a otras neuronas. Las señales se ponderan a través de las conexiones, dándoles diferentes niveles de importancia. Por lo tanto, la red neuronal artificial imita todo este proceso usando una función de activación y mediante el sumatorio de las señales de entradas (véase Figura 30 (b)).

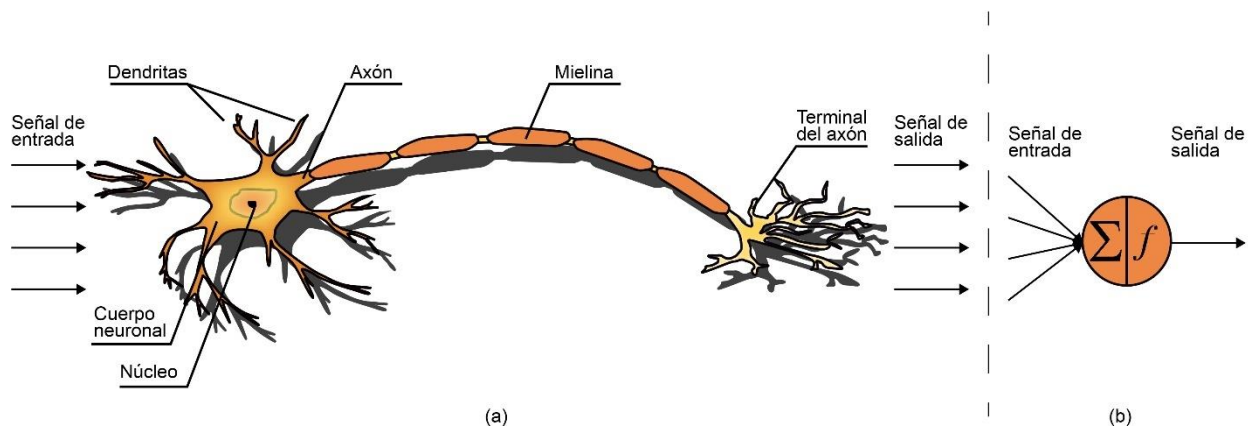


Figura 30. Esquemas de neuronas: (a) neurona biológica y (b) neurona artificial. Fuente: Propia.

Entre las distintas arquitecturas de redes neuronales artificiales, los perceptrones multicapa (en inglés, *multilayer perceptron* (MLP)) son los que mejores prestaciones ofrecen, ya que se tratan de modelos supervisados con capacidades de aproximación universal (Barron, 1993; Cybenko, 1989; Hornik, Stinchcombe, & White, 1989) que permiten abordar problemas complejos, tanto de clasificación (Raghu & Sriraam, 2017) como de regresión (Mba, Meukam, & Kemajou, 2016). Los perceptrones multicapa se caracterizan por presentar una arquitectura de tres o más capas (véase Figura 31): una capa de entrada, una o varias capas intermedias (conocidas como capas ocultas) y una capa de salida. La capa de entrada corresponde a la entrada de los valores de las variables de entrada del conjunto de datos utilizado y la variable de salida, a la respuesta dada por el modelo. En cada una de las capas del perceptrón existe una serie de neuronas. El valor de salida de cada neurona se obtiene mediante la suma de los valores de las neuronas entrantes ponderadas con pesos sinápticos y aplicándole una función de activación (véase Ecuación (125)). Estas conexiones se propagan hasta la capa de salida (véase Ecuación (126)), obteniendo el valor de respuesta estimado por el perceptrón multicapa (\hat{Y}_{MLP}).

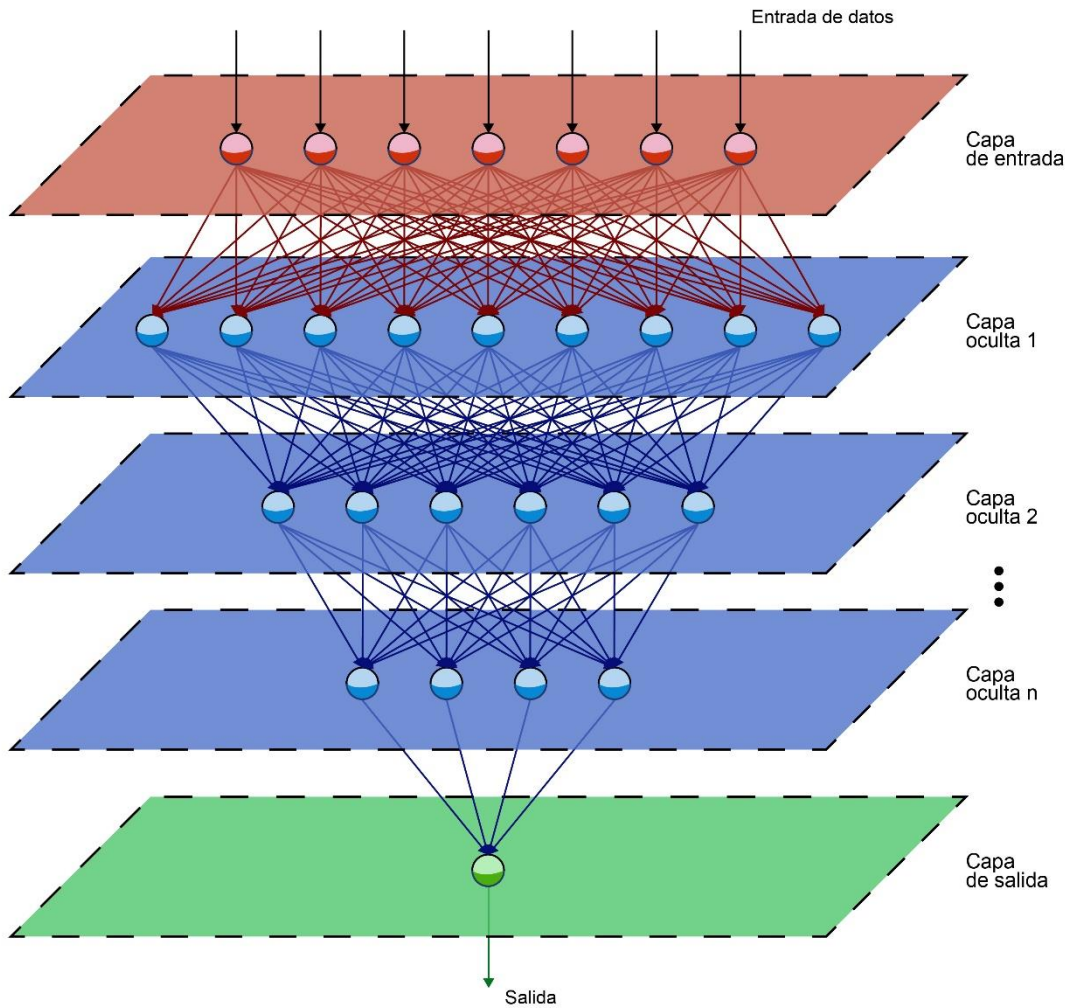


Figura 31. Esquema de un perceptrón multicapa de diferentes capas ocultas. Fuente: propia.

$$y_k = \sigma \left(\sum_{j=1}^d w_{kj}^{(1)} x_j + w_{k0}^{(1)} x_0 \right) \quad (125)$$

$$\hat{Y}_{MLP} = \sigma \left(\sum_{k=1}^M w_{lk}^{(2)} \sigma \left(\sum_{j=0}^d w_{kj}^{(1)} x_j \right) + w_{l0}^{(2)} y_0 \right) \quad (126)$$

Donde x_j son los valores de la capa de entrada, $w_{k0}^{(1)}$ y x_0 son el peso y el valor de entrada de la neurona de sesgo de la capa de entrada, $w_{kj}^{(1)}$ son los pesos de la capa oculta, $w_{l0}^{(2)}$ y y_0 son el peso y el valor de entrada de la neurona de sesgo de la capa oculta, $w_{lk}^{(2)}$ son los pesos de la capa de salida, y_k es la salida de una neurona de la capa oculta y σ es la función de activación. A efectos de toda la investigación realizada con perceptrones multicapa, tanto en la capa oculta como en la capa de salida se utilizó una función de activación sigmoideal (véase Ecuación (127)). La ventaja de este tipo de función es que permite comprimir un conjunto de entrada infinito en un conjunto de salida finito.

$$\sigma = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (127)$$

Como se ha visto en las Ecuaciones (125) y (126), la estimación dada por el perceptrón multicapa depende en gran medida de los valores asignados a los pesos sinápticos. Por lo tanto, el objetivo principal del algoritmo es el ajuste de estos pesos de tal manera que garanticen el mayor ajuste entre el valor estimado de salida con respecto al valor real. Para ello, se aplica un algoritmo de aprendizaje a un conjunto de datos de entrenamiento. En el caso de esta investigación, los perceptrones multicapa se entrenaron mediante retro propagación (Rumelhart, Hinton, & Williams, 1986; Y. N. Wang, 1994; Werbos, 1974). Este tipo de aprendizaje empieza con la selección de una asignación aleatoria de valores para los pesos sinápticos, luego se incluyen una serie de datos introducidos aleatoriamente y se analiza el error obtenido entre el valor de salida del modelo y el valor de salida real. Con este análisis se realiza un ajuste de los valores de los pesos sinápticos y se repite el proceso con las diferentes instancias del conjunto de datos hasta finalizar el proceso.

Así pues, en el entrenamiento del perceptrón multicapa resulta fundamental elegir el algoritmo de entrenamiento adecuado que minimice la función de error asociada al modelo. Para esta investigación se utilizó el algoritmo Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) (Fletcher, 1980), perteneciente a los métodos Cuasi-Newton. Este tipo de métodos presenta una ventaja significativa sobre el método de Newton, ya que son más rápidos y tienen un menor consumo de recursos al no requerir el cálculo directo del Hessiano y de su inversa. Para ello, se calculan aproximaciones de la inversa del Hessiano en cada iteración.

Asimismo, la arquitectura juega un papel fundamental para determinar el perceptrón multicapa que realice las mejores estimaciones, por lo que se debe determinar el número de neuronas y de capas ocultas que mejor ajusten los valores de salida estimados. Por este motivo, en las diversas aplicaciones de perceptrones multicapa de esta tesis, el número de nodos varió en las capas ocultas, mientras que el número de capas ocultas dependió del tipo de aplicación destinada para los modelos.

Para concluir, resulta conveniente destacar el grado de importancia que han adquirido las redes neuronales artificiales a través de los perceptrones multicapa en el campo de la edificación en los últimos años. En este sentido, se pueden destacar distintos estudios relacionados con el análisis energético de los edificios:

- Magalhães, Leal y Horta (2017) evaluaron el uso de redes neuronales artificiales para predecir la demanda energética de calefacción en función del comportamiento de los ocupantes. Los resultados permitieron obtener modelos con un coeficiente de correlación superior al 93 % en las estimaciones del modelo.
- Deb, Eang y Santamouris (2018) emplearon redes neuronales artificiales para predecir el ahorro energético relacionado con la utilización de sistemas de climatización en edificios de oficinas y compararon los resultados obtenidos con regresiones lineales múltiples. Los resultados determinaron un mejor rendimiento para la red neuronal artificial que para la regresión lineal, con un incremento porcentual en el coeficiente de correlación de un 37,25 %.
- Bienvenido-Huertas¹¹, Rubio-Bellido, Pérez-Ordóñez y Martínez-Abella (2019) analizaron el uso de redes neuronales artificiales para estimar temperaturas de consigna adaptativas en aplicaciones de edificios que no dispongan de sondas de temperatura exterior. Para ello, se emplearon datos provenientes de estaciones meteorológicas de una agencia oficial (en el caso del estudio, provenían de Meteogalicia). Los resultados reflejaron la posibilidad de utilizar estos modelos para realizar estimaciones ajustadas de las temperaturas de consigna.

¹¹ Investigación realizada por el autor de esta tesis de manera paralela durante su desarrollo. La investigación se publicó en la revista *Energies* (Cuartil: Q3; Factor de impacto: 2,707).

- Bienvenido-Huertas¹², Pérez-Fargallo, Alvarado-Amador y Rubio-Bellido (2019) evaluaron la influencia climática en el desarrollo de perceptrones multicapa para estimar el riesgo de pobreza energética en la asignación de viviendas sociales en Chile. Los resultados reflejaron que el diseño de modelos adaptados a cada clima estima con mayor exactitud el riesgo de pobreza energética.

Asimismo, se pueden destacar varios estudios en los que se han usado las redes neuronales artificiales para abordar los problemas de caracterización térmica en edificios:

- Buratti, Barelli y Moretti (2012) desarrollaron una red neuronal artificial que estimó la transmitancia térmica de ventanas de madera mediante parámetros de fácil determinación (p. ej., el tipo de ventana o el espesor del marco).
- Chudzik (2017) evaluó la utilización de redes neuronales artificiales para estimar el coeficiente de transferencia de calor en la superficie de materiales aislantes y, de esta manera, poder determinar con mayor exactitud sus propiedades térmicas.
- Aznar, Echarri, Rizo y Rizo (2018) diseñaron redes neuronales de retardo de tiempo para estimar el valor de temperatura previsto en los próximos 30 minutos en cada uno de los materiales que componen los cerramientos de los edificios.

6.3.2.2. Bosques aleatorios

Otra de las tipologías de algoritmos de aprendizaje automático que más se aplica son los algoritmos de tipo árbol. Dentro de estos, uno de los de mayor empleo es el algoritmo de árbol de clasificación y regresión (en inglés, *classification and regression tree* (CART)). Este algoritmo fue desarrollado por Breiman et al. (2017) y se caracteriza por construir modelos en forma de árbol invertido (véase Figura 32). Los árboles están compuestos por unos nodos interiores correspondientes a las variables, unos arcos correspondientes a los valores del nodo origen y las hojas correspondientes al valor de la variable dependiente. Al disponer de un esquema formado por nodos y hojas, son fáciles de interpretar y facilitan la comprensión de la solución adoptada para el problema (Xu, Watanachaturaporn, Varshney, & Arora, 2005). Por lo tanto, el algoritmo funciona dividiendo el espacio de entrada en subregiones, de manera que simplifica problemas complejos con modelos simples (Sun, 2018).

En el desarrollo del modelo, la estructura óptima se obtiene mediante un proceso de partición recursiva binaria del conjunto de datos utilizado mediante una regla de partición que tiene cada nodo del modelo. Esta regla se establece disminuyendo la suma de cuadrados de los residuos (véase Ecuación (128)). Una vez realizado el proceso de inducción, la aplicación de la poda (es decir, la eliminación de los nodos ineficaces) permite generalizar y reducir la complejidad del modelo. En la configuración del algoritmo es necesario establecer la profundidad del árbol y el número mínimo de instancias por nodo.

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (128)$$

Donde y_i es el valor de salida real de cada observación i y \hat{y}_i es el valor estimado por el modelo.

¹² Investigación realizada por el autor de esta tesis de manera paralela durante su desarrollo. La investigación se publicó en la revista *Energy and Buildings* (Cuartil: Q1; Factor de impacto: 4,495).

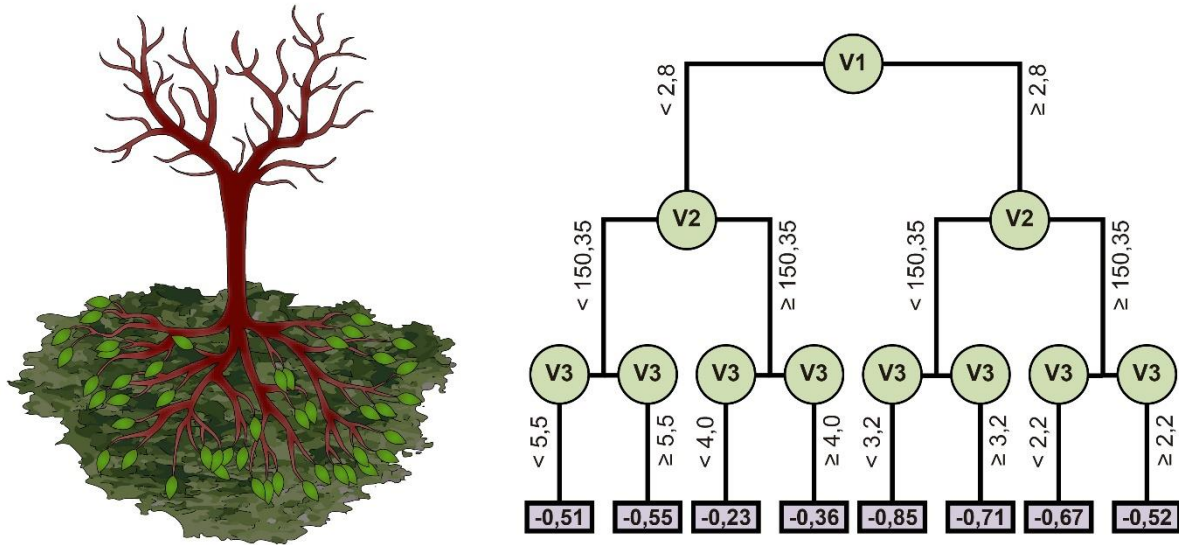


Figura 32. Esquema de un modelo CART. Fuente: propia.

A pesar de que la facilidad de uso e interpretabilidad del modelo ha propiciado una amplia utilización del algoritmo CART, existen varios estudios que destacan las limitaciones asociadas a su uso (Dudoit, Fridlyand, & Speed, 2002; Larivière & Van Den Poel, 2005). Ante esta circunstancia, el algoritmo de bosques aleatorios (en inglés, *random forest* (RF)) constituye una oportunidad para emplear modelos CART con un mejor rendimiento en las estimaciones realizadas. Los bosques aleatorios permiten adoptar una solución a estos problemas mediante la generación de un conjunto de modelos CART que se desarrollan en paralelo para reducir la varianza y el sesgo del nuevo modelo (Breiman, 1996, 2001). Así pues, la estructura que presentan los modelos obtenidos por los bosques aleatorios es la de un bosque de árboles (véase Figura 33). El modelo de bosque aleatorio da la estimación mediante el promedio de las estimaciones de cada uno de los modelos CART:

$$\hat{Y}_{RF} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \hat{Y}_t \tag{129}$$

Donde T es el número de árboles y \hat{Y}_t es el valor de salida proporcionado por cada árbol.

Otras ventajas de los bosques aleatorios es que permiten manejar grandes conjuntos de datos. Además, no se ven afectados por valores atípicos en las instancias del conjunto de datos de entrenamiento (Assouline, Mohajeri, & Scartezzini, 2018) y su aprendizaje se realiza mediante un método combinado de aprendizaje. Los boques aleatorios, al tratarse de un método combinado de aprendizaje (mediante agregación *bootstrap*), permite obtener un mejor comportamiento que un modelo individual (Dietterich, 2000). Para el entrenamiento de bosques aleatorios, el algoritmo comienza con una selección de N muestras *bootstrap* del conjunto de datos de entrenamiento (Breiman, 2001). Las muestras se generan tomando muestras aleatorias del conjunto de datos que garanticen la uniformidad de las muestras (en algunos casos, es posible que algunas instancias aparezcan repetidas en diferentes muestras). Cada muestra *bootstrap* genera un árbol de regresión del bosque. Además, cada nodo de cada árbol se divide utilizando un subconjunto de m predictores seleccionados aleatoriamente, de manera que se reduce la influencia de los predictores más fuertes.

Al igual que para los perceptrones multicapa, la arquitectura o forma que tiene el modelo de bosques aleatorios afecta a su rendimiento. En este sentido, el número de árboles que componen el modelo tiene una influencia significativa en su rendimiento (Zhou & Qiu, 2018).

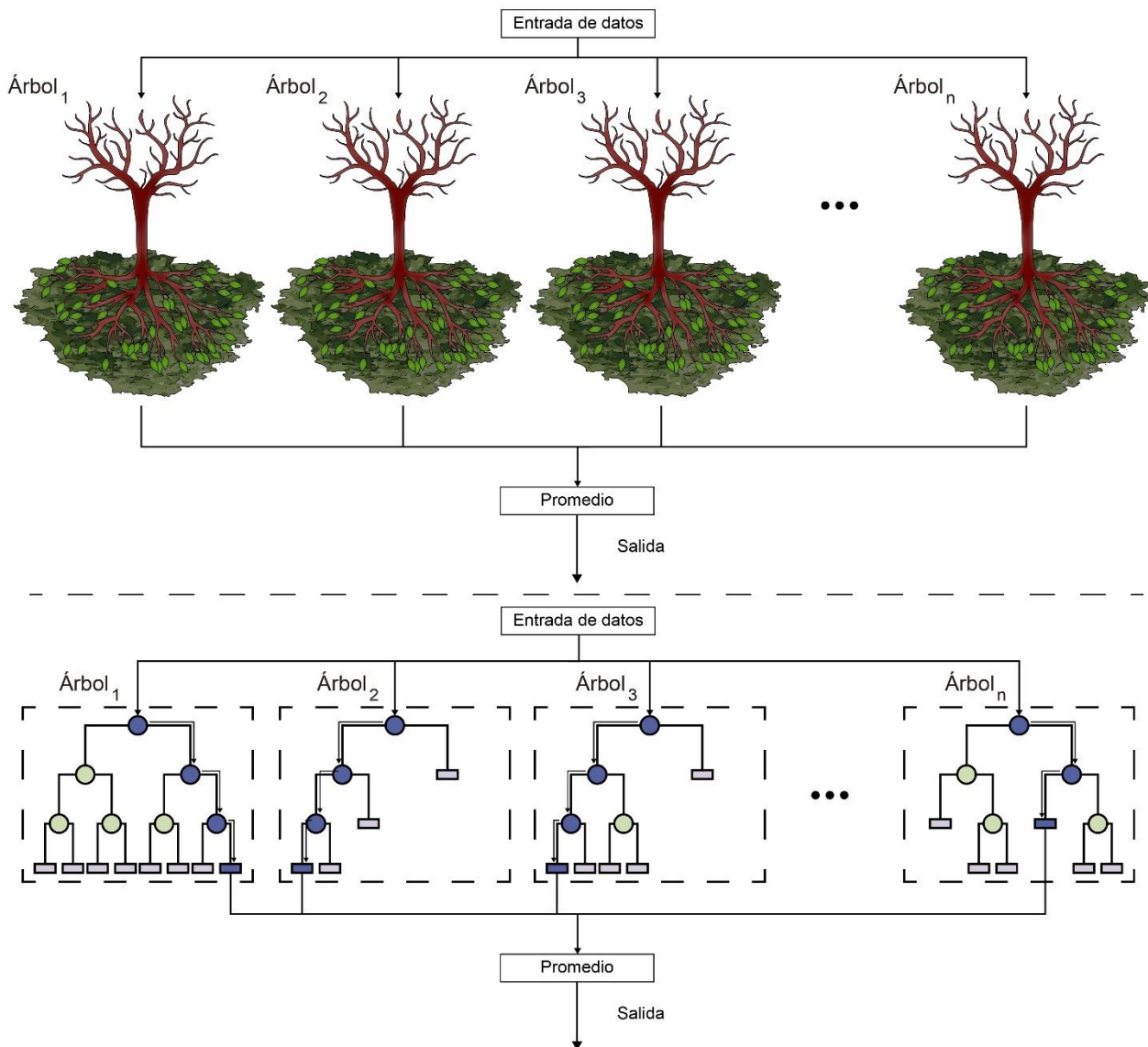


Figura 33. Esquema de un modelo de bosques aleatorios. Fuente: propia.

Finalmente, y al igual que con las redes neuronales artificiales, se pueden destacar diferentes estudios realizados en los últimos años acerca de la aplicación de bosques aleatorios en edificios:

- Smarra et al. (2018) evaluaron la utilización de bosques aleatorios con el objetivo de emplearlos como modelos de control predictivo de los edificios para garantizar un ahorro energético y un confort térmico adecuados. La aplicación de la metodología desarrollada por los autores ante 3 tipos de datos distintos (datos históricos, datos simulados y datos de un caso de estudio) aseguró la robustez del planteamiento con bosques aleatorios.
- Wang et al. (2018) aplicaron bosques aleatorios para estimar el consumo horario de electricidad en edificios educativos en Italia. Las estimaciones de los modelos de bosques aleatorios se compararon con las de los modelos de regresión de vector soporte y de CART. Los resultados reflejaron una mejor predicción obtenida por los bosques aleatorios, con un incremento porcentual en el índice de rendimiento de entre un 5 % y un 25 %.

- Lu, Li, Bai y Wang (2019) utilizaron bosques aleatorios para evaluar el rendimiento por hora en bombas de calor geotérmicas y las estimaciones se analizaron con las obtenidas con redes neuronales artificiales. Los resultados reflejaron un mejor rendimiento para los bosques aleatorios no solo desde la vertiente del grado de ajuste, sino también desde la vertiente de interpretabilidad del modelo y del coste computacional para su desarrollo.

6.3.2.3. Procedimiento de entrenamiento y testeo de los modelos planteados

En líneas generales, las redes neuronales artificiales se aplicaron como algoritmo principal en diversas aplicaciones. En el caso de que la red neuronal artificial presentara un rendimiento deficiente, se utilizaban los bosques aleatorios. Este criterio se realizó con base en la experiencia obtenida en otras investigaciones llevadas a cabo por el autor de esta tesis.

Asimismo, la división de los conjuntos de datos usados para el entrenamiento y el testeo de los modelos varió dependiendo de la investigación:

- En el caso de la investigación concerniente a la aplicación de correcciones de almacenamiento de calor, dado que el número de datos utilizados eran menores (al provenir únicamente de monitorizaciones reales), se decidió que el conjunto de entrenamiento estuviera constituido por 66 de los 69 ensayos, mientras que 3 de ellos se emplearon para el testeo de los modelos diseñados.
- En el caso de las investigaciones concernientes a la optimización del método termométrico y a la estimación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007, se decidió que el conjunto de datos se dividiera, de manera aleatorio, en un 75 % de las observaciones para el conjunto de entrenamiento y en un 25 % para el conjunto de testeo. Esto se pudo realizar porque la muestra disponible era significativamente mayor a la de la otra investigación (en este caso, se disponía de 22820 ensayos). Además, se asignaron 3 o más cerramientos para el análisis detallado de las estimaciones dadas por los modelos.

Respecto al entrenamiento de los diferentes modelos diseñados, se empleó una validación cruzada de 10 iteraciones (véase Figura 34). Las ventajas de utilizar la validación cruzada en el entrenamiento de los modelos son bastante significativas, ya que permiten disminuir el sesgo y la varianza del modelo (Kohavi, 1995). Todos los conjuntos de entrenamiento se dividieron en 10 subconjuntos de manera aleatoria. Para cada iteración se usaron 9 subconjuntos para el entrenamiento y el subconjunto restante para el testeo. El rendimiento de los modelos se obtiene del valor promedio de las 10 iteraciones.

Como se ha comentado anteriormente, la configuración adecuada de los perceptrones multicapa y de los bosques aleatorios influye en su rendimiento. Por este motivo, en los estudios se evaluaron distintas arquitecturas para los dos algoritmos:

- En el caso de los perceptrones multicapa, el número de nodos varió en la capa oculta entre 1 y 15, mientras que el número de capas ocultas osciló entre 1 y 3. Esto último solo se realizó en uno de los estudios debido al excesivo tiempo computacional requerido para el entrenamiento de modelos con arquitecturas complejas.
- En el caso de los bosques aleatorios, el número de árboles varió entre 2 y 50.

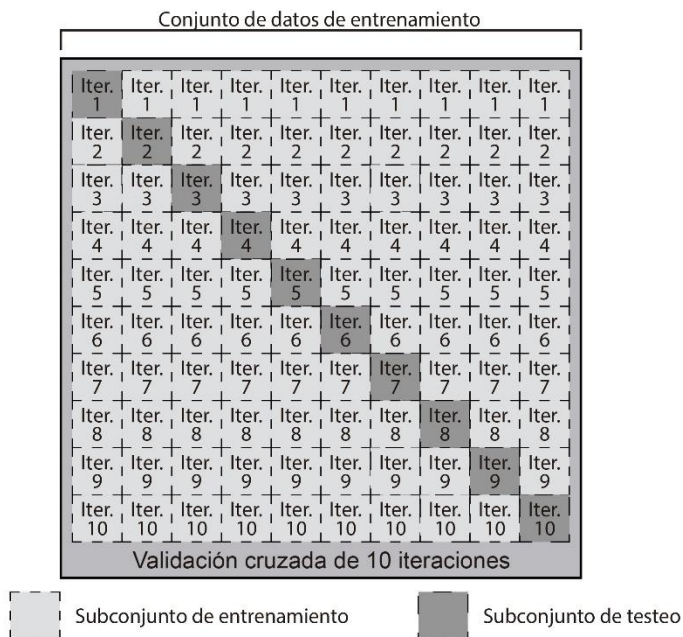


Figura 34. Esquema de la validación cruzada de 10 iteraciones en un conjunto de datos de entrenamiento. Fuente: propia.

Para evaluar el rendimiento de los modelos en las fases de entrenamiento y de testeo, se emplearon diferentes parámetros estadísticos. Dado que los planteamientos varían a lo largo de la investigación (se distinguen planteamientos de regresión y de clasificación), los parámetros estadísticos analizados variaron conforme a la tipología de variable de salida. En el caso de los planteamientos de regresión, los indicadores de calidad utilizados fueron los siguientes: el coeficiente de determinación (R^2) (véase Ecuación (130)), el error promedio absoluto (en inglés, *mean absolute error (MAE)*) (véase Ecuación (131)) y el error de la raíz cuadrada de la media (en inglés, *root mean square error (RMSE)*) (véase Ecuación (132)). Estos parámetros se han usado en numerosas investigaciones para evaluar el rendimiento de los modelos de regresión.

$$R^2 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - e_i)^2}{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{a}_i)^2} \right) \quad (130)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |r_i - e_i|}{n} \quad (131)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - e_i)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (132)$$

Donde r_i es el valor real de la variable de salida, e_i es el valor estimado de la variable de salida y n es el número de observaciones del conjunto de datos utilizado.

En el caso del planteamiento de clasificación, los parámetros estadísticos analizados fueron: la ratio de verdaderos positivos (en inglés, *true positive ratio (TP)*) (véase Ecuación (133)), la ratio de falsos positivos (en inglés, *false positive ratio (FP)*) (véase Ecuación (134)), el coeficiente kappa de Cohen (véase Ecuación (135)) y el área bajo la curva Característica Operativa del Receptor (en inglés, *receiver operating characteristic (ROC)*) (véase Ecuación (136)). Las ratios TP y FP indican el porcentaje de acierto en las estimaciones realizadas por el modelo y el coeficiente kappa permite determinar la coincidencia de la estimación con la clase real, mientras que el área bajo la curva ROC determina la probabilidad de que el modelo clasifique

correctamente la clase analizada, existiendo un valor diferente para cada posible etiqueta o salida.

$$TP = \frac{\text{Observaciones correctamente clasificadas}}{\text{Número total de observaciones}} \quad (133)$$

$$FP = \frac{\text{Observaciones incorrectamente clasificadas}}{\text{Número total de observaciones}} \quad (134)$$

$$K = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (135)$$

$$\text{AreaROC} = \int_0^1 (1 - G(F^{-1}(1 - t))) dt \quad (136)$$

Donde p_o es el acuerdo observado relativo entre los observadores, p_e es la probabilidad hipotética de acuerdo por azar y G y F son la distribución de muestras positivas y negativas, respectivamente.

6.3.3. Subproceso 3.3.: Análisis clúster

En el caso de los análisis de los términos convectivos en los planteamientos de termografía infrarroja, se realizó un análisis clúster debido al elevado número de correlaciones estudiadas. Este análisis es una técnica estadística multivariante que clasifica un conjunto de objetos de tal forma que, por un lado, objetos similares o cercanos acaben en el mismo conglomerado y, por otro lado, objetos distintos o lejanos resulten en grupos distintos, proporcionando como resultado grupos homogéneos que son diferentes entre sí (Kaufman & Rousseeuw, 2009). El análisis clúster toma de inicio una muestra de individuos de los que conocemos el valor de p variables. Tras realizar el análisis clúster, se obtiene una partición X de la muestra de individuos, formada por k grupos.

Para conseguir estas agrupaciones, resulta necesario disponer de medidas de asociación que nos indiquen si dos objetos son semejantes para poder clasificarlos dentro del mismo grupo. Estas medidas de asociación pueden ser: (i) la similitud (dos objetos forman parte del mismo grupo cuando son semejantes); y (ii) la distancia (dos objetos forman parte de un mismo grupo cuando están cerca). Respecto a las distancias métricas, existe una amplia variedad, tales como la distancia euclídea, la distancia Canberra o la distancia Minkowski (Johnson & Wichern, 1998). A efectos de este estudio, se utilizó la distancia euclídea.

La distancia euclídea entre dos individuos, x_i y x_j , de los que conocemos el valor de p variables, se define de la siguiente manera:

$$d(x_i, x_j) = \left[\sum_{r=1}^p (x_{ir} - x_{jr})^2 \right]^{1/2} \quad (137)$$

Un tercer aspecto clave del análisis clúster es la metodología que se utiliza para clasificar los elementos en grupos. Existen principalmente dos métodos: (i) los métodos no jerárquicos, los cuales toman como punto de partida el número k de grupos que se desea obtener (formados aleatoriamente) y, posteriormente, de modo iterativo, se van mejorando hasta alcanzar el número k de grupos de individuos óptimo; y (ii) los métodos jerárquicos, que pueden clasificarse en aglomerativos (en los que se parte de una partición de n grupos con un individuo en cada uno de ellos que, posteriormente, se van agrupando hasta terminar con una partición

de un único grupo de n individuos) y disociativos (en los que se parte de una partición de un único grupo de n individuos que, posteriormente, se va dividiendo hasta terminar con una partición de n grupos de un individuo).

En esta investigación se utilizó el método de Ward (Jr., 1963), el cual pertenece a los métodos jerárquicos aglomerativos. El método de Ward calcula la distancia entre dos clústeres como la suma de cuadrados entre grupos en el análisis de la varianza para todas las variables. Posteriormente, reduce la suma de cuadrados dentro de los clústeres sobre todas las particiones posibles obtenidas fusionando dos clústeres de la etapa anterior. Su principal ventaja es que se trata de un método muy eficiente que tiende a crear clústeres de pequeño tamaño, por lo que se adaptaba a lo planteado en la investigación. A efectos de las investigaciones llevadas a cabo en el marco de esta tesis, el análisis clúster se realizó en función del flujo de convección obtenido en los distintos ensayos por cada correlación experimental. Esto permitió simplificar el análisis y la interpretación de los resultados, así como detectar los patrones de similitud entre las diversas expresiones del término convectivo.

7. Resultados y discusión

En esta sección se exponen y discuten los resultados obtenidos a través de las investigaciones relacionadas con el análisis y la optimización de los métodos de evaluación de la transmitancia térmica. Tal y como se ha reflejado, esta tesis plantea 3 objetivos específicos; por tanto, en este apartado se distinguen tres subapartados, los cuales corresponden a cada uno de los objetivos específicos planteados:

- Optimización del término convectivo en los métodos cuantitativos de termografía infrarroja.
- Análisis y optimización del método termométrico.
- Determinación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 con mediciones *in situ*.

Cabe destacar que las investigaciones asociadas a cada uno de estos objetivos se desarrollan ampliamente en 6 de las 9 publicaciones compendiadas dentro de esta tesis. Tal y como se ha comentado en los apartados introductorios de la tesis, las otras 3 publicaciones estuvieron encaminadas hacia la importancia de la evaluación de la transmitancia térmica y hacia la revisión detallada del estado de la cuestión. En la Tabla 29 se indican las publicaciones que cada investigación incluye. Asimismo, en los próximos subapartados se hace una revisión y discusión de los principales aspectos de cada investigación, al igual que se ha realizado en las investigaciones compendiadas de apartados anteriores (véase Apartado 3).

Por lo tanto, en este apartado no se reproduce de manera exacta el contenido de los artículos publicados. Para una lectura detallada de cada uno de ellos, el lector debe remitirse al listado de publicaciones incluidas en el Anexo A de esta tesis.

Investigación	Publicaciones
Optimización del término convectivo en los métodos cuantitativos de termografía infrarroja	<ol style="list-style-type: none"> 1. Comparison of quantitative IRT to estimate U-value using different approximations of ECHTC in multi-leaf walls 2. Influence of ICHTC correlations on the thermal characterization of façades using the quantitative internal infrared thermography method
Análisis y optimización del método termométrico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations 2. Applying an artificial neural network to assess thermal transmittance in walls by means of the thermometric method ¹³ 3. Optimizing the evaluation of thermal transmittance with the thermometric method using multilayer perceptrons
Determinación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 con mediciones <i>in situ</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Automation and optimization of in-situ assessment of wall thermal transmittance using a Random Forest algorithm

Tabla 29. Publicaciones asociadas a las investigaciones de optimización de los métodos experimentales de transmitancia térmica. Fuente: propia.

¹³ Publicación ganadora del Premio Trimestral IUACC (Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla) a la Mejor Publicación Científica en Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Noviembre 2018.

7.1. Optimización del término convectivo en los métodos cuantitativos de termografía infrarroja¹⁴

El análisis de la optimización del término convectivo en los métodos cuantitativos de termografía infrarroja se basó en los resultados obtenidos de la campaña experimental 2. Tal y como se ha indicado, en esta campaña se realizaron 4 ensayos en 3 cerramientos diferentes, tanto desde el interior como desde el exterior.

Con los resultados se analizó la amplia variedad de formulaciones posibles para caracterizar la transmitancia térmica. En este punto resulta conveniente destacar que en la literatura científica se distinguen dos tipos de planteamiento: (i) los planteamientos que consideran el término convectivo como el término total de transferencia de calor; y (ii) los planteamientos que usan el término de convección y el de radiación. A estos se les añade el planteamiento de convección simplificada y de radiación en los métodos de exterior.

Así pues, todos los planteamientos se analizaron con las distintas ecuaciones de las Tablas 25-28. Sin embargo, previo a la discusión de los resultados, se realizó una simplificación de la gran variedad de expresiones mediante el análisis clúster, de manera que se pudo reducir el volumen de expresiones empleadas y facilitar la interpretación de los resultados. Este análisis también reflejó algunos patrones de similitud entre diferentes ecuaciones que muestran las limitaciones que puedan presentar los criterios de restricción de cada ecuación cuando se utilizan en otras aplicaciones.

En la Tabla 30 se muestra un resumen de los clústeres obtenidos por cada tipología de correlación. Tal y como se ha indicado en el subapartado 6.3.3., el análisis se realizó en función del valor obtenido para el flujo de convección en cada ensayo. Cabe destacar que también se analizaron los valores usados para el término de convección en las investigaciones existentes relacionadas con el método cuantitativo de termografía infrarroja (Albatici et al., Dall'O et al., Madding, Fokaidis y Kalogirou y Tejedor et al.).

En esta línea, se pueden señalar varios aspectos interesantes de los resultados del análisis clúster. El primero de ellos está relacionado con la agrupación de correlaciones de viento o de diferencias de temperatura que establecen criterios opuestos de aplicación. Estos criterios, tal y como se mostró en las Tablas 25-28, dependían de varios aspectos, tales como la dirección del viento o el tipo de superficie de acabado del cerramiento. Asimismo, se agruparon ecuaciones asociadas a un tipo determinado de flujo (laminar o turbulento). En segundo lugar, se puede destacar que la mayor parte de las correlaciones experimentales que utilizan una longitud característica presentaron similitudes entre sí. Por lo tanto, estos resultados reflejan que los criterios que definieron los autores que publicaron cada una de las correlaciones pueden presentar discrepancias cuando se comparan con correlaciones que establecen criterios opuestos. Este aspecto puede abrir el debate acerca de las definiciones operacionales que deban tener asociadas cada una de las correlaciones. La mayor parte de estas definiciones se

¹⁴ Todo lo reflejado en el subapartado 7.1. corresponde a las siguientes publicaciones compendiadas dentro del marco de esta tesis:

- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J., & Marín, D. (2019). Comparison of quantitative IRT to estimate U-value using different approximations of ECHTC in multi-leaf walls, *Energy and Buildings*. 184, 99–113. doi:10.1016/j.enbuild.2018.11.028.
- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J., & 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. doi:10.1016/j.buildenv.2018.12.056.

basan en los criterios metrológicos que los autores siguieron para los ensayos realizados (p. ej., los ensayos en túnel de viento).

Exterior		Interior					
Velocidad del viento		Números adimensionales		Diferencias de temperatura		Números adimensionales	
Clúster	Ecuaciones	Clúster	Ecuaciones	Clúster	Ecuaciones	Clúster	Ecuaciones
a	(63), (64)	a	(75), (82)	a	(93)	a	(118)
b	(62), (70)	b	(83)	b	(86), (94), (98), (107)	b	(24), (25), (108), (114), (116)
c	(61)	c	(78), (79), (80)	c	(99)	c	(110)
d	(44), (65)	d	(25) (adaptada al exterior)	d	(91), (92)	d	(113)
e	(23), (30), (34), (42), (45), (71), (74)	e	(76), (77)	e	(89), (95)	e	(121)
f	(50), (66)	f	(81)	f	(88), (90), (104), (105)	f	(107), (109), (111), (119), (122), (124)
g	(37), (39), (69)			g	(96)	g	(120)
h	(55)			h	(84), (97), (102)	h	(112), (115), (117), (123)
i	(72), (73)			i	(87), (100), (103)		
j	(49)			j	(85)		
k	(52), (67)			k	(21)		
l	(54), (58), (60)			l	(101)		
m	(53), (59)						
n	(46)						
o	(40), (51), (68)						
p	(47)						
q	(41)						
r	(38), (43)						
s	(31), (32), (33), (35), (36)						
t	(22), (48), (56), (57)						

Tabla 30. Agrupaciones de las correlaciones experimentales del término convectivo obtenidas con el análisis clúster. Fuente: propia.

Una vez realizado el análisis clúster entre las diferentes expresiones, se procedió al análisis de los resultados. Para ello, en el caso de los métodos de exterior, se consideró el valor obtenido en cada uno de los 4 ensayos, mientras que, en el método de interior, se evaluó un resultado total al final de estos. El motivo fue la gran variabilidad que presentaron los resultados de exterior debido, principalmente, a la lectura de la velocidad del viento local y de la temperatura superficial exterior. Este aspecto refleja una de las principales debilidades que presentan los métodos de exterior con respecto a los de interior a causa de la gran influencia de las condiciones climáticas exteriores, la cuales pueden generar variaciones en la expresión del término convectivo externo.

Al comparar los resultados obtenidos, se aprecian grandes diferencias entre los dos métodos. Para que el lector disponga de cierta información al respecto, se han resumido las desviaciones

porcentuales obtenidas en las Figuras 35, 36 y 37 entre el valor medido y el de referencia (en las figuras se representa la desviación porcentual con respecto al valor del método de la ISO 9869-1:2014, la cual aparece en las dos publicaciones compendiadas).

Planteamiento de convección

Desviación porcentual mínima

49,09	26,58	34,48
45,45	15,19	22,41
42,73	30,38	55,17
26,36	3,8	1,72
7,27	12,66	53,45
19,09	10,13	41,38
11,82	17,72	60,34
31,82	26,58	79,31
18,18	1,27	0
42,73	0	1,72
19,09	5,06	10,34
17,27	5,06	24,14
26,36	70,89	122,41
20,91	70,89	141,38
34,55	45,57	96,55
2,73	118,99	194,83
9,09	106,33	175,86
48,18	44,3	37,93
51,82	53,16	51,72
78,18	77,22	74,14

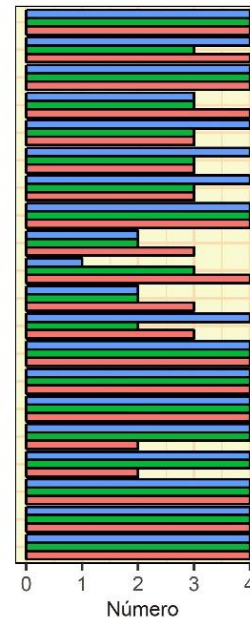
C-A C-B C-C
Casos de estudio

Desviación porcentual máxima

74,55	74,68	106,9
76,36	65,82	93,1
71,82	98,73	131,03
80	60,76	63,79
75,45	101,27	131,03
77,27	74,68	100
74,55	110,13	127,59
71,82	131,65	150
84,55	34,18	37,93
88,18	45,57	20,69
82,73	41,77	53,45
80,91	67,09	79,31
64,55	198,73	220,69
79,09	212,66	237,93
69,09	159,49	181,03
101,82	291,14	320,69
86,36	265,82	294,83
91,82	86,08	63,79
93,64	92,41	75,86
96,36	94,94	86,21

C-A C-B C-C
Casos de estudio

Número de desviaciones superiores al 20%



Desviación porcentual mínima

10,91	48,1	172,41
14,55	40,51	162,07
4,55	60,76	191,38
21,82	30,38	139,66
9,09	103,8	167,24
15,45	81,01	156,9
7,27	108,86	174,14
1,82	117,72	193,1
27,27	56,96	115,52
30,91	45,57	91,38
23,64	69,62	124,14
17,27	86,08	139,66
11,82	162,03	237,93
17,27	160,76	255,17
3,64	136,71	212,07
35,45	210,13	308,62
29,09	197,47	289,66
25,45	5,06	60,34
20	2,53	51,72
4,55	3,8	32,76

C-A C-B C-C
Casos de estudio

Desviación porcentual máxima

122,73	240,51	263,79
119,09	226,58	248,28
131,82	265,82	289,66
100,91	200	218,97
81,82	267,09	284,48
92,73	240,51	256,9
86,36	275,95	293,1
106,36	297,47	317,24
65,45	192,41	203,45
69,09	165,82	174,14
64,55	208,86	220,69
61,82	232,91	244,83
119,09	364,56	386,21
152,73	377,22	403,45
109,09	326,58	346,55
174,55	455,7	486,21
160,91	431,65	458,62
73,64	115,19	120,69
74,55	101,27	106,9
78,18	86,08	87,93

C-A C-B C-C
Casos de estudio

Número de desviaciones superiores al 20%

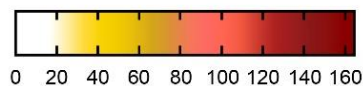
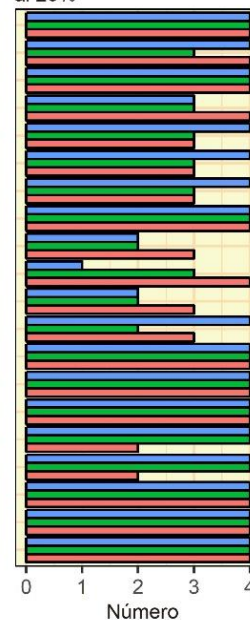


Figura 35. Desviaciones porcentuales obtenidas en los métodos desde el exterior que utilizan correlaciones de velocidades del viento. En los gráficos de la derecha se representa el número de resultados válidos obtenidos en cada caso de estudio. Fuente: propia.

Los métodos de exterior se caracterizan por presentar unas desviaciones porcentuales significativamente altas, así como una gran variación en la oscilación de los resultados. En este

sentido, las correlaciones con velocidades de viento y con números adimensionales obtuvieron desviaciones superiores al 20 % con respecto al valor de referencia, tanto en los planteamientos de convección como en los de convección y radiación. Las contribuciones porcentuales de las correlaciones fueron diferentes en función de la ecuación.

Dado que existieron desviaciones significativas en los dos planteamientos y que las contribuciones variaron de una ecuación a otra, se pudo destacar las limitaciones que existen en la determinación de la contribución de radiación. En este aspecto, algunas investigaciones anteriores han señalado las dificultades que existen para determinar el componente de radiación desde el exterior. Sin embargo, el hecho de que los planteamientos de convección obtuvieran un número bajo de resultados representativos permite reflejar las dificultades de aplicación del método exterior.

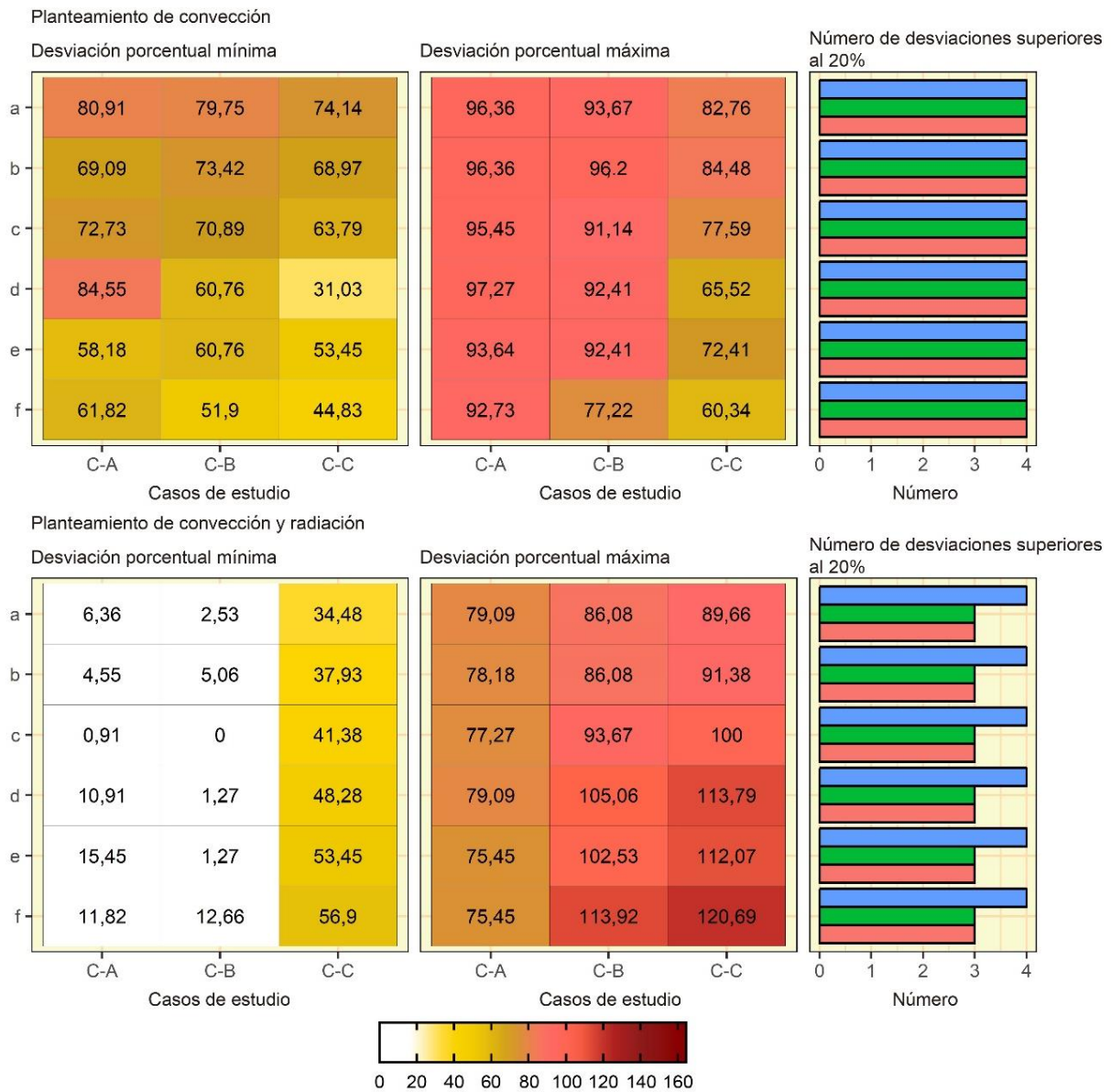


Figura 36. Desviaciones porcentuales obtenidas en los métodos desde el exterior que utilizan correlaciones de números adimensionales. En los gráficos de la derecha se representa el número de resultados válidos obtenidos en cada caso de estudio. Fuente: propia.

En el caso del planteamiento de convección simplificada y de radiación, los resultados obtenidos fueron similares a los del clúster t en el planteamiento de convección y radiación a

causa de la nula contribución porcentual que tiene el flujo de convección en el flujo total en el planteamiento de convección simplificada. Únicamente en aquellos en los que existió una mayor contribución porcentual del término de convección, se obtuvieron resultados diferentes.

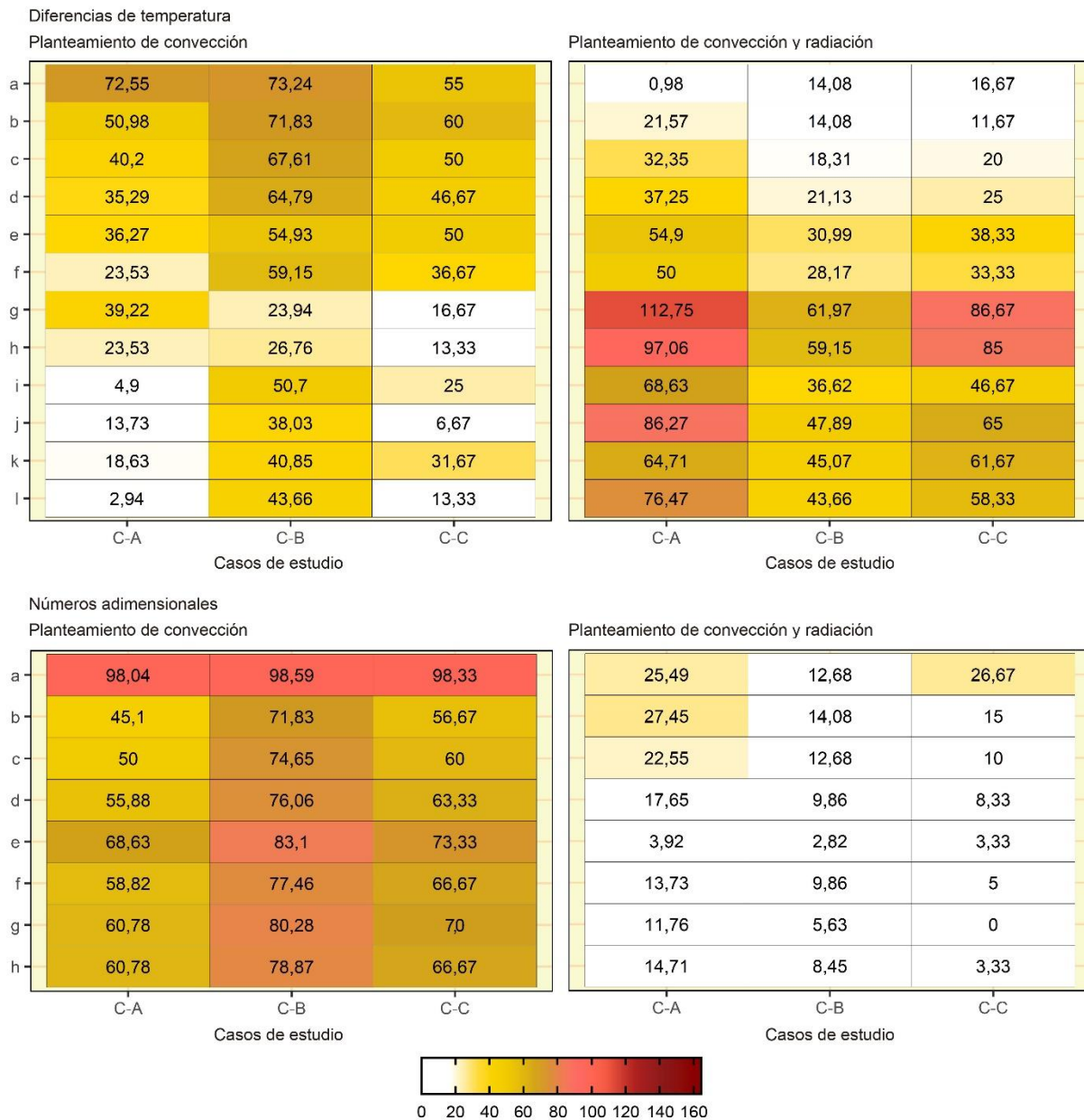


Figura 37. Desviaciones porcentuales obtenidas en los métodos desde el interior para los dos tipos de correlaciones (diferencias de temperatura y números adimensionales). Fuente: propia.

Asimismo, se encontraron diferencias significativas en los resultados en función del tipo de velocidad de viento utilizado en los cálculos (velocidad media del viento a lo largo de todo el ensayo o velocidades instantáneas). Este aspecto, poco desarrollado en las investigaciones existentes, parece reflejar una limitación de aplicación del método de exterior.

En el caso de los métodos de interior, tanto las correlaciones de temperatura como de números adimensionales se caracterizaron por presentar un mayor número de casos con resultados representativos. Para ello, fue necesario emplear el planteamiento de convección y radiación, ya que el planteamiento de convección se caracterizó por presentar un menor número de

resultados representativos. De acuerdo con esto, cabe señalar que la contribución porcentual que presenta el flujo de convección con respecto al total varía de manera significativa en función de la correlación experimental utilizada, existiendo algunas, como las incluidas en el clúster g de diferencias de temperatura, que se caracterizaron por presentar una contribución mayor que la de radiación en algunos casos de estudio.

Respecto a la proporción del término convectivo de los números adimensionales, se consiguieron resultados similares en todos los casos de estudio. Por consiguiente, las desviaciones porcentuales entre las diferentes agrupaciones de expresiones obtuvieron resultados similares.

Al comparar los resultados de las dos tipologías de correlaciones experimentales usadas para los métodos de interior, destacó la mayor robustez que presentaron las correlaciones de números adimensionales, las cuales obtuvieron un mayor número de casos con desviaciones porcentuales bajas.

Por lo tanto, los resultados reflejaron que el mejor planteamiento posible para los métodos cuantitativos de termografía infrarroja son los ensayos realizados desde el interior y cuya formulación se basa en correlaciones de números adimensionales. En este sentido, las diferencias detectadas entre los dos enfoques fueron bastante significativas y, a pesar de que el método de exterior pueda presentar algunas ventajas de aplicación (debido a que las termografías se pueden hacer desde el exterior, afectando poco a los usuarios de la vivienda), las limitaciones encontradas en los resultados obtenidos desaconsejan su utilización. Así pues, la ejecución de los ensayos con unas condiciones controladas ha permitido que las expresiones de números adimensionales existentes obtuvieran un resultado ajustado.

7.2. Análisis y optimización del método termométrico¹⁵

El análisis del método termométrico se orientó desde una aplicación directa del método en varios casos de estudio hacia el planteamiento y la optimización de nuevas metodologías de cálculo. Para ello, se emplearon los datos recopilados en la campaña 1 y se analizaron con diferentes planteamientos.

Las investigaciones agrupadas dentro de este objetivo deben entenderse como una secuencia lógica de trabajo, la cual desemboca en la investigación final recogida en el subapartado 7.2.3. En la Figura 38 se incluye el flujo de trabajo de las distintas fases en las que se dividió esta investigación.

¹⁵ Todo lo reflejado en el subapartado 7.2. corresponde a las siguientes publicaciones compendiadas dentro del marco de esta tesis:

- Bienvenido-Huertas, D., Rodríguez-Álvaro, R., Moyano, J., Rico, F., & Marín, D. (2018). Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations, *Energies*. 11(2), 1–17. doi:10.3390/en11020360.
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Rodríguez-Jiménez, C. E., & 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. doi:10.1016/j.apenergy.2018.10.052.
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordóñez, J. L., & Moyano, J. (2019). Optimizing the evaluation of thermal transmittance with the thermometric method using multilayer perceptrons, *Energy and Buildings*. 198, 395–411. doi:10.1016/j.enbuild.2019.06.040.

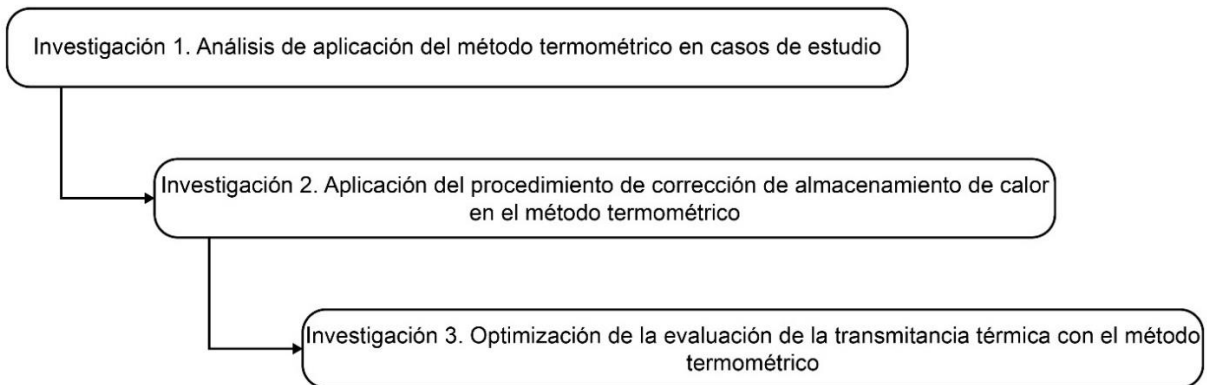


Figura 38. Flujo de trabajo de las investigaciones realizadas en relación con el análisis y la optimización del método termométrico. Fuente: propia.

7.2.1. Análisis de aplicación del método termométrico en casos de estudio

La aplicación del método se analizó en 8 casos de estudio en varias épocas del año: invierno (C-1, C-2 y C-3), verano (C-4, C-5, C-6 y C-7) y otoño (C-8). Las monitorizaciones se realizaron según los criterios recogidos por los principales fabricantes de equipos que aplican el método, aunque también se incorporaron algunos criterios de colocación de las sondas de acuerdo con lo establecido en la literatura científica. Dado que los ensayos se hicieron en diferentes estaciones, no se emplearon sistemas de apoyo para el mantenimiento de la temperatura interior. Asimismo, se emplearon dos tipologías de equipos dispares para evaluar la posible influencia causada por la variación del instrumental. La diferencia entre estos dos equipos se encuentra en la medición de las temperaturas ambientales: uno utiliza termopares conectados al gestor de datos y ubicados en posiciones adecuadas y el otro, una sonda exterior conectada por *bluetooth*, así como una sonda ubicada en el mismo gestor de datos para la medición de la temperatura interior. Por lo tanto, aunque este gestor de datos se ubicó a una distancia próxima de las sondas de temperatura del otro equipo, sus condiciones de contorno no fueron las mismas.

Los resultados obtenidos en esta fase mostraron la gran influencia de las condiciones climáticas en los ensayos. En esta línea, los cerramientos que se monitorizaron en condiciones que garantizaron un gradiente térmico elevado (es decir, los cerramientos C-1, C-2, C-3, C-4, C-5 y C-7) presentaron resultados ajustados con desviaciones inferiores al 20 % con respecto al valor de referencia (véase Figura 39). Estos resultados se obtuvieron tras realizar un filtrado de los datos obtenidos, considerando únicamente aquellos registros que midieron diferencias de temperatura superiores a 5 °C debido a las dificultades para medir gradientes térmicos más elevados.

Además, los resultados de los dos equipos fueron desiguales. Como ya se ha comentado, los equipos se distinguían en las sondas usadas para la medición de la temperatura interior y exterior. Esta diferencia generó variaciones significativas en los resultados: mientras que, en el primer equipo, se consiguieron resultados ajustados en un número elevado de cerramientos, en el segundo equipo solamente se obtuvieron resultados válidos en un caso de estudio. Por lo tanto, la variabilidad que pueden presentar los principales equipos comerciales que utilicen el método a nivel profesional puede conllevar a la obtención de resultados atípicos.



Figura 39. Desviación porcentual entre los valores de referencia y los valores medidos por el método termométrico con los dos equipos utilizados. Fuente: propia.

Estos cerramientos se caracterizaron por presentar un gradiente térmico elevado durante la monitorización. Por consiguiente, el método presenta un mejor rendimiento en mediciones realizadas con un gradiente térmico elevado. Para ello, se realizó un análisis comparativo del efecto de incrementar el gradiente térmico utilizado en el filtrado de datos. Sin embargo, no fue posible conseguir una gran muestra de casos de estudios a causa de las dificultades para alcanzar gradientes térmicos de más de 10 °C. El incremento del filtrado de datos se caracterizó por presentar una mayor estabilización en los datos próximos al valor de referencia, con un mayor índice de repetibilidad. Por lo tanto, este filtrado es condición indispensable para la aplicación del método debido a la eliminación del error asociado a los datos registrados con gradientes térmicos más bajos.

En resumen, los resultados obtenidos en esta primera fase destacan el potencial que el método termométrico presenta para determinar la transmitancia térmica en cerramientos existentes. La aplicación del método en unas condiciones de gradiente térmico elevado, empleando el instrumental apropiado y realizando un procesado posterior de los datos garantizaría la representatividad de los resultados. Sin embargo, existen aspectos que pueden limitar su utilización, como el hecho de que usa un valor teórico para el coeficiente de transferencia de calor total interior. De esta manera, tendrían sentido las diferencias detectadas en algunos de los resultados. Así pues, buscar una relación entre el flujo de calor real del cerramiento y el flujo de calor del método termométrico reduciría las limitaciones asociadas al empleo del método y, además, se mantendría su principal ventaja: la medición de la temperatura superficial en vez del flujo de calor.

7.2.2. Aplicación del procedimiento de corrección de almacenamiento de calor en el método termométrico

En el análisis del estado del arte se observó que otra de las principales limitaciones del método termométrico estaba relacionada con la carencia de procedimientos de análisis de datos alternativos, tal y como ocurre en el método termoflujométrico. En este sentido, la norma ISO 9869-1:2014 establece un procedimiento de cálculo alternativo para correcciones por almacenamiento de calor, reflejado en la Ecuación (8) del subapartado 4.3.2. de esta tesis. Este procedimiento se basa en una corrección del flujo de calor medido. Por lo tanto, según la Ley de Enfriamiento de Newton, se puede adaptar dicho procedimiento al método termométrico.

Sin embargo, este procedimiento se caracteriza por requerir un conocimiento preciso de la composición y las características de las capas del cerramiento. Por consiguiente, en esta investigación no solo se adaptó el planteamiento de almacenamiento de calor al método termométrico, sino que se planteó una metodología que pudiera realizar este cálculo sin necesidad de conocer las propiedades térmicas de la fachada. Para ello, se desarrollaron diferentes perceptrones multicapa. El conjunto de entrenamiento y testeado empleado se obtuvo a través de 56 cerramientos monitorizados en la campaña, así como los 13 ensayos facilitados por AVRA. Estos ensayos cumplían el requisito de aplicación del método: el valor de transmitancia térmica obtenido al final del ensayo variaba en más de un 5 % con respecto al valor obtenido 24 horas antes o con respecto a los datos de los dos primeros días. De cada uno de estos ensayos se disponía de un conocimiento preciso de las propiedades térmicas de los cerramientos para poder aplicar el procedimiento corrector de la ISO 9869-1:2014.

Las variables de entrada del modelo que se configuraron fueron aquellas variables lógicas que pueden obtenerse a través del proceso de monitorización. Así pues, se plantearon como variables de entrada la temperatura interior, exterior y superficial interior, la diferencia del promedio de temperaturas de las primeras 24 horas, tanto interior como exterior, y el intervalo de tiempo entre medidas. También se consideraron el espesor de la fachada y el período constructivo del edificio. Este último se debe determinar a través de la consulta de los datos catastrales del edificio. Debido a las correlaciones lineales existentes entre las diferencias de temperaturas para cada valor de transmitancia térmica, se desarrolló una arquitectura de perceptrón multicapa en la que se transformaron las variables de temperatura interior, exterior y superficial interior en la diferencia de temperatura de aire interior y exterior, así como en la diferencia de temperatura de aire interior y superficial interior. Para el entrenamiento de los perceptrones multicapa, se utilizaron 66 ensayos y se reservaron 3 para su análisis individual. Las arquitecturas que se examinaron fueron de 1 capa oculta y con un número de neuronas en esta, el cual varió entre 4 y 15 hasta determinar la configuración con un mejor rendimiento.

En primer lugar, al analizar los resultados analíticos del método, se detectó que la aplicación del método corrector disminuyó el tiempo necesario de ensayo y las desviaciones porcentuales en la mayoría de los casos de estudio. Los resultados obtenidos no fueron representativos únicamente en dos ensayos debido, entre otras posibles circunstancias, a una posible degradación de las propiedades térmicas del muro. En estos casos, aunque la aplicación del método no obtuvo resultados representativos, la aplicación del procedimiento corrector permitió reducir la desviación porcentual.

Uno de los principales aspectos que se plantearon en el estudio en relación con el procedimiento corrector era la posible influencia que el planteamiento presentaba a causa de la ubicación del material aislante con respecto a la cámara de aire. Esto se debe a las posibles variaciones que las ejecuciones de fachadas presentan en función de si se coloca el material aislante desde el interior o desde el exterior. Para ello, se realizó un análisis del procedimiento en un cerramiento típico con cuatro materiales aislantes, los cuales variaron en espesor y en posición dentro del muro. En este análisis se observó que la variación del espesor del material aislante fue la principal causa de variación en el procedimiento corrector, con una variación nula por la ubicación del material aislante y con una desviación de hasta un 2,55 % por el tipo de material aislante usado. Por lo tanto, este aspecto sirvió para destacar la importancia de considerar la variable del espesor del cerramiento como variable de entrada en el perceptrón multicapa.

En segundo lugar, respecto al rendimiento obtenido con los perceptrones multicapa, en la fase de entrenamiento se detectó que el coeficiente de determinación y los parámetros de error presentaron valores adecuados para las dos tipologías de perceptrones multicapa analizadas, con unas arquitecturas óptimas de 14 nodos en la capa oculta. A pesar de que los rendimientos

obtenidos por los dos planteamientos de perceptrones multicapa fueron similares, existieron diferencias que destacaron la mayor robustez de uno de ellos. En este sentido, el análisis de los parámetros estadísticos y del grado de ajuste de las nubes de puntos reflejó que el modelo que usa las mediciones de temperatura interior, exterior y superficial interior fue el que obtuvo un mejor grado de ajuste entre los valores reales y los estimados. Esto mismo se puede apreciar en el histograma de la Figura 40, donde se representa la desviación porcentual entre los valores reales y los estimados. Asimismo, la mayor concentración de datos tuvo lugar en desviaciones inferiores al 10 %.

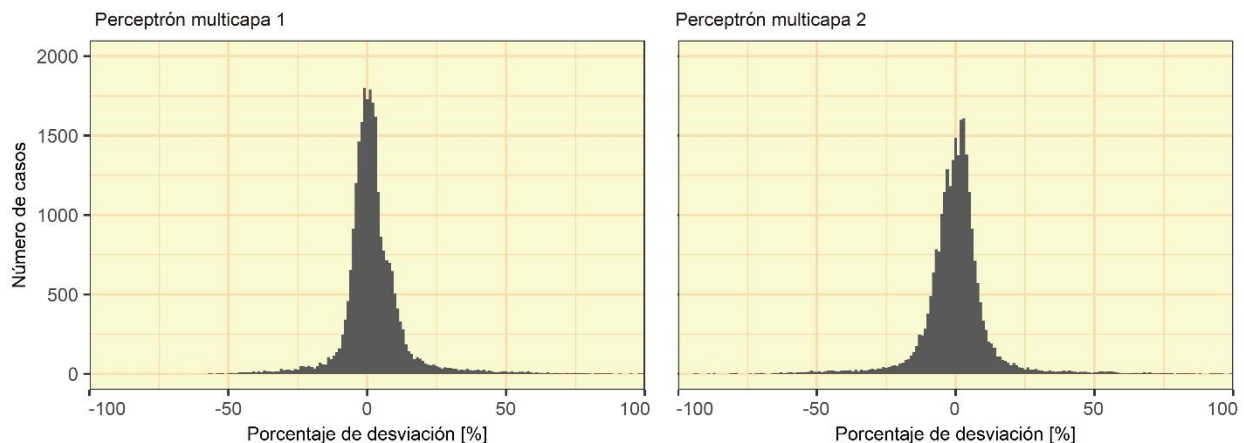


Figura 40. Histograma con la desviación porcentual entre los valores reales y los estimados de los dos perceptrones multicapa diseñados en el estudio (el ancho de columna es de un valor de un 1 %). Fuente: propia.

Una vez determinada la configuración más adecuada de perceptrón multicapa, se procedió a la evaluación de los resultados estimados en las 3 fachadas destinadas a un análisis individual. En las 3 tipologías de cerramiento se consiguieron resultados representativos empleando varias duraciones de ensayo según el cerramiento, con un requerimiento de una mayor duración en el caso de la fachada con una mayor resistencia térmica. Asimismo, el perceptrón multicapa conllevó a resultados más ajustados que los obtenidos por la ecuación del método termométrico y por la adaptación a dicho método del procedimiento corrector por almacenamiento de calor. Además, no fue necesario realizar un filtrado de datos para la consecución de resultados representativos, ya que se obtuvieron resultados similares al no aplicarse dicho filtrado.

Por consiguiente, los resultados de esta investigación permitieron aplicar el procedimiento corrector de almacenamiento de calor en el método termométrico, así como la optimización del cálculo de dicho procedimiento mediante su estimación con perceptrones multicapa. Los buenos resultados obtenidos con el empleo de los perceptrones multicapa abren la posibilidad de su aplicación, junto con otras tipologías de algoritmos de aprendizaje automático, para solventar los distintos problemas asociados a la caracterización térmica de cerramientos. Este aspecto constituyó un aspecto novedoso del estudio, ya que existen pocas investigaciones que aplican estas técnicas para afrontar la caracterización térmica de elementos de la envolvente de edificios.

7.2.3. Optimización de la evaluación de la transmitancia térmica con el método termométrico

Como ya se ha indicado en el apartado 7.2.1., una de las principales debilidades del método termométrico está relacionada con la utilización de un valor teórico para el coeficiente de transferencia de calor total interior. Este valor teórico proviene de la ISO 6946:2007 para unas condiciones determinadas de confort térmico interior y para unos valores de emisividad representativos de la mayor parte de los materiales de construcción. Sin embargo, pueden

existir diferencias entre el flujo de calor real de un edificio y el flujo de calor obtenido por el método termométrico (el cual sería el numerador de la Ecuación (19)). Por lo tanto, la aplicación del método de la ISO 9869-1:2014 tiene asociada una mayor representatividad de los resultados cuando el valor teórico de la ISO 6946:2007 presenta limitaciones para calcularse.

Para evitar estas posibles desviaciones, se planteó la estimación de los resultados del método de la ISO 9869-1:2014 a través de las variables y de los procedimientos del método termométrico. Para ello, se partió de la experiencia exitosa obtenida de la investigación de corrección de almacenamiento de calor y se empleó una muestra de estudio significativamente superior. Las variables resultantes a través del método de la ISO 9869-1:2014 son tanto el método promedio como el método promedio con correcciones por almacenamiento de calor.

Con respecto al diseño de las variables de los perceptrones multicapa, se realizó una modificación para que se pudiera abarcar una amplia variedad de ensayos dentro del conjunto de datos: mientras que en la investigación anterior se examinaron todas las medidas instantáneas de cada ensayo (de tal manera que se pudieran realizar estimaciones con formato de series temporales), en esta investigación se emplearon los resultados conseguidos al final del ensayo, pero con el mismo tipo de variables de entrada (es decir, las temperaturas interior, exterior y superficial interior, la diferencia del promedio de temperaturas de las primeras 24 horas, tanto interior como exterior, el espesor, el tiempo y el período constructivo). Para ello, se evaluaron dos posibilidades obvias de diseño con las variables monitorizadas: el sumatorio de estas o el valor promedio obtenido al final del ensayo. El análisis previo reflejó que ambos tipos de variables de entrada arrojaban resultados idénticos, por lo que, para reducir el tamaño de los conjuntos de datos y, de esta manera, agilizar el proceso, se consideraron los valores promedios de las variables de temperatura. Respecto al tiempo, se utilizó la duración total del ensayo en vez del intervalo de tiempo entre medidas. Cabe señalar que las diferencias del promedio de temperaturas de las primeras 24 horas se emplearon para estimar las dos tipologías de variables de salida. Aunque estas diferencias de temperaturas están más asociadas a la aplicación de los procedimientos de corrección de almacenamiento de calor, se pretendió que la estructura de los dos tipos de perceptrones multicapa fuera homogénea con el objeto de simplificar las posibles aplicaciones reales de la metodología.

Asimismo, se decidió variar el número de capas ocultas analizadas, estudiando arquitecturas de 1, 2 y 3 capas ocultas y con un número de nodos que osciló entre 2 y 15. Para el entrenamiento de los modelos se empleó el 75 % de los 22820 ensayos simulados, mientras que su testeó se realizó con el 25 % restante. También se usaron otras 12 tipologías de cerramientos para su evaluación individual.

En el análisis de los resultados se comprobó, en primer lugar, qué arquitectura presentó un mejor rendimiento. En líneas generales, los modelos presentaron unos valores adecuados para el coeficiente de determinación y para los parámetros óptimos de error en los dos planteamientos. No obstante, las arquitecturas más complejas obtuvieron una ligera mejora en los parámetros estadísticos, lo que conllevó a que las estimaciones fueran más ajustadas con respecto a los valores reales de los dos planteamientos (véase Figura 41).

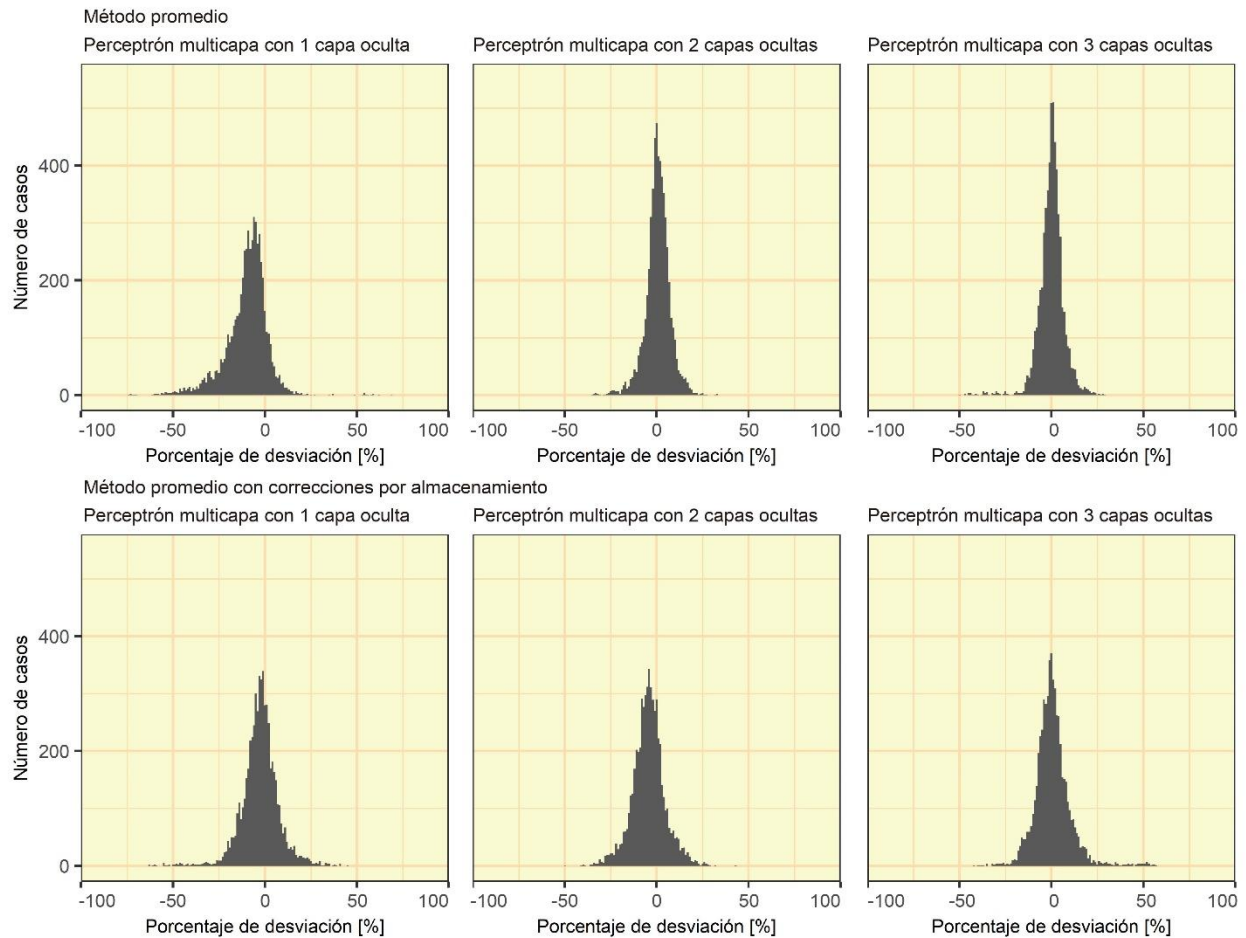


Figura 41. Histograma con la desviación porcentual entre los valores reales y los estimados de los diferentes perceptrones multicapa diseñados en el estudio para la estimación del método promedio y del método promedio con correcciones por almacenamiento de calor (el ancho de columna es de un valor de un 1 %). Fuente: propia.

Con respecto al análisis de los 12 muros no considerados en el conjunto de datos de evaluación, las estimaciones realizadas por los modelos presentaron desviaciones porcentuales inferiores al 20 % con respecto al valor real (véase Figura 42). En este sentido, en la mayoría de los casos, las estimaciones obtenidas por los modelos presentaron desviaciones inferiores al 10 % e, incluso, se llegaron a obtener estimaciones exactas (es decir, con una desviación del 0 %). Por lo tanto, se refleja el grado de ajuste óptimo de los resultados obtenidos con los perceptrones multicapa.

El análisis continuó con la influencia del período constructivo y la posibilidad de utilizar perceptrones multicapa diseñados para cada uno de estos períodos a raíz de los resultados de influencia que se obtuvieron ante el desconocimiento de las variables de entrada. En este análisis se detectó que una de las variables que presentó una mayor influencia, después de las variables puras de medición (es decir, las temperaturas interior, exterior y superficial interior), fue el período constructivo. Así pues, el desconocimiento del período constructivo disminuyó el número de resultados representativos en los muros para su análisis individual: de un 100 % cuando se conocía a tan solo un 16,67 % cuando se desconocía.

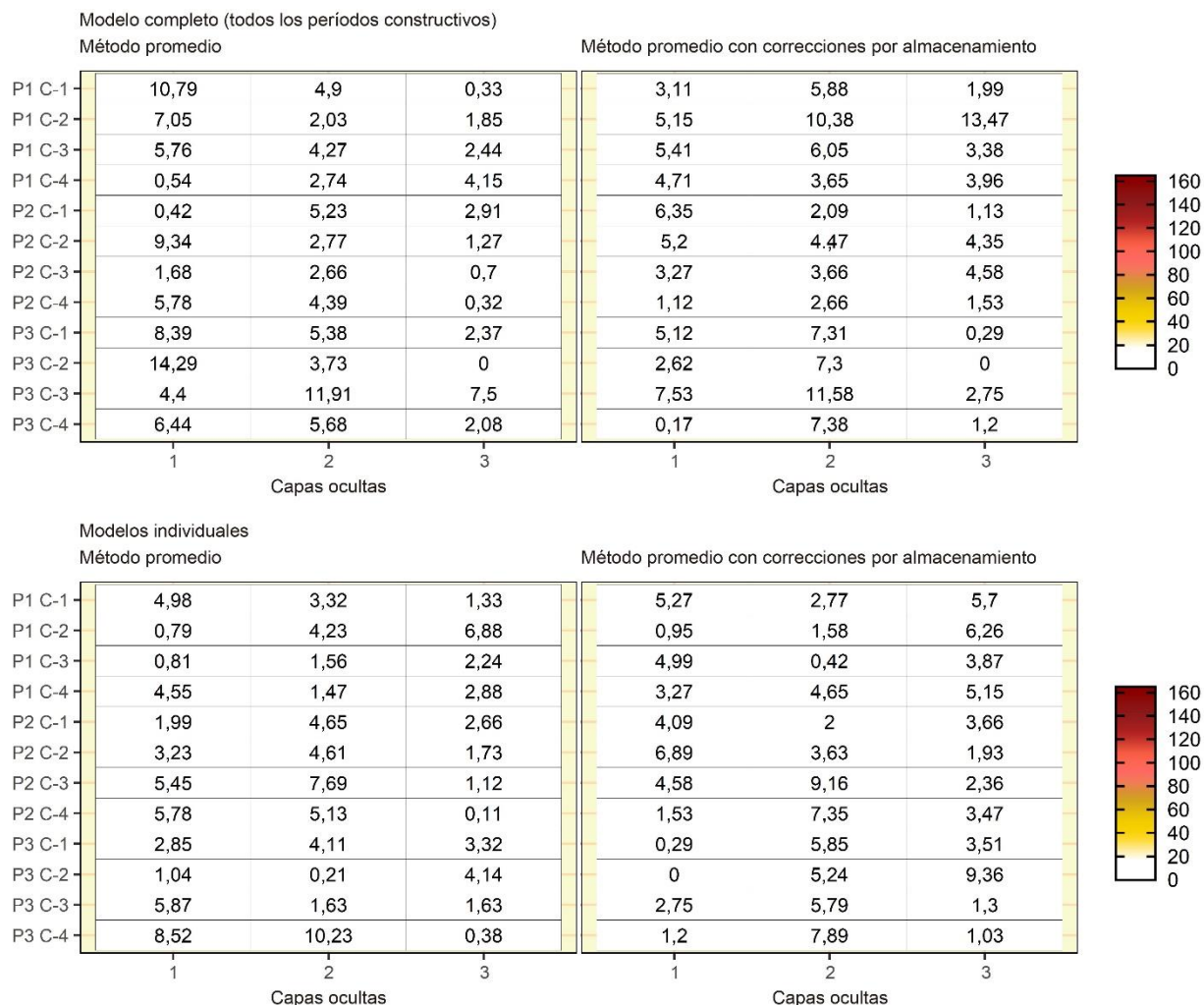


Figura 42. Desviación porcentual entre los valores reales y los estimados por los diferentes perceptrones multicapa diseñados en el estudio de los cerramientos utilizados para su análisis individual. Fuente: propia.

A raíz de estos resultados, se analizó la posibilidad de utilizar perceptrones multicapa diseñados exclusivamente para cada período constructivo. Para el diseño de estos perceptrones, el conjunto de datos de entrenamiento se dividió en tres subconjuntos diferentes, uno por cada período constructivo.

El rendimiento de los modelos individuales de cada período reflejó que las estimaciones que obtuvieron presentaron, en líneas generales, un grado de ajuste mejor que el del modelo completo. Únicamente el perceptrón multicapa del período 1 obtuvo un peor rendimiento. En el caso de los modelos de los períodos 2 y 3, el coeficiente de determinación presentó incrementos porcentuales de hasta un 1,06 % y con disminuciones porcentuales en los parámetros de error de hasta un 54,78 %. En el caso de los muros para su análisis individual, el rendimiento de las estimaciones obtenidas fue similar a las del modelo completo, aunque en estos modelos las desviaciones porcentuales fueron siempre inferiores al 10 %.

Así pues, los resultados reflejados en este estudio sirvieron para eliminar una de las principales debilidades del método termométrico: el uso de una variable teórica para el coeficiente de transferencia de calor total interior. La estimación del valor del método de la ISO 9869-1:2014 permite asegurar que el valor obtenido por el método termométrico no tenga asociada las limitaciones del empleo del valor teórico. Por lo tanto, la utilización del perceptrón multicapa debe constituir el planteamiento de análisis de datos más adecuado para la aplicación del método termométrico. Asimismo, las diversas opciones de obtención de resultados (método

promedio y método promedio de almacenamiento de calor) dota al método de una mayor riqueza y posibilidades de utilización. Finalmente, la mejora del rendimiento obtenido por los perceptrones multicapa diseñados para cada período constructivo garantiza la extrapolación de la metodología a otras regiones, ya que permite diseñar modelos que se adapten a los períodos constructivos de diferentes regiones.

7.3. Determinación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 con variables *in situ*¹⁶

Los resultados obtenidos a través de las investigaciones descritas en el subapartado 7.2. mostraron el potencial de aplicar algoritmos de aprendizaje automático para abordar los problemas de caracterización térmica en los cerramientos. Por consiguiente, gracias a este tipo de técnicas se podría abordar una de las principales limitaciones que presentan los métodos experimentales relacionada con el valor de referencia utilizado, el cual se debe obtener a través de la ISO 6946:2007. Sin embargo, para su determinación resulta necesario conocer las propiedades térmicas de las capas del cerramiento. Por lo tanto, la ISO 6946:2007 presenta el mismo problema que el descrito para el procedimiento de almacenamiento de calor de la ISO 9869-1:2014.

Así pues, esta investigación evalúa las posibilidades de estimación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 a través de variables medidas *in situ*. Para ello, se emplea el esquema de variables del método termoflujométrico y del método termométrico. Así pues, los resultados de esta investigación pretenden determinar la transmitancia térmica de la ISO 6946 a través de las variables que se medirían con los dos métodos experimentales. Además, y como valor añadido de esta investigación, la metodología plantea la estimación del período constructivo del cerramiento, necesidad derivada de las investigaciones descritas en el apartado 7.2. A pesar de que el período constructivo de un cerramiento se puede determinar a través de los datos catastrales, la disposición de una técnica analítica que permita estimarlo a través de las variables medidas reduciría la incertidumbre asociada a aquellos edificios que se diseñaron en los períodos de transición entre normativas.

Para conseguir este objetivo, se utilizó el conjunto de los datos simulados en la investigación de la optimización del método termométrico. Como algoritmos de regresión, se analizaron tanto el perceptrón multicapa como los bosques aleatorios. Asimismo, el diseño de las variables de entrada se basó en la experiencia previa de la investigación del apartado 7.3., aunque se realizaron modificaciones. En este sentido, pruebas previas permitieron comprobar cómo era necesario dividir las variables de temperatura interior, exterior, superficial o de flujo de calor en tres variables distintas (promedio, máximo y mínimo), de manera que el grado de ajuste de los modelos aumentaría.

Además, se descartó el uso de las variables de diferencia de temperatura de las primeras 24 horas al estar más asociadas a la aplicación del método de corrección de la ISO 9869-1:2014, así como la variable del período constructivo, ya que era una de las variables a determinar. Al igual que ocurrió en la investigación del subapartado 7.3., el objetivo consistía en que los modelos diseñados fueran homogéneos con el objeto de simplificar las posibles aplicaciones reales de la metodología.

¹⁶ Todo lo reflejado en el subapartado 7.3. corresponde a la siguiente publicación compendiada dentro del marco de esta tesis:

- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordóñez, J. L., & Oliveira, M. (2020). Automation and optimization of in-situ assessment of wall thermal transmittance using a Random Forest algorithm, *Building and Environment*. 168. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106479.

Los resultados del estudio reflejaron que la utilización de los perceptrones multicapa y de los bosques aleatorios realizaban estimaciones ajustadas tanto del valor de transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 como del período constructivo. Sin embargo, existen diferencias entre los dos algoritmos que muestran el mayor potencial de los bosques aleatorios para realizar estimaciones ajustadas de estas dos variables. En este sentido, para el método termoflujométrico, el 75,14 % de las estimaciones tuvieron un error comprendido entre 0 W/(m²K) y 0,01 W/(m²K) en los modelos de bosques aleatorios, mientras que el porcentaje fue menor en los perceptrones multicapa (un 21,27 %). Además, los valores límites en los que osciló el error del conjunto de datos de testeo fueron menores en los bosques aleatorios: en el método termoflujométrico, el error estuvo entre -0,181 W/(m²K) y 0,167 W/(m²K) y en el perceptrón multicapa, entre -0,318 W/(m²K) y 0,324 W/(m²K)).

En el caso del período constructivo, hubo un mayor número de aciertos en las estimaciones de los 3 períodos considerados con los bosques aleatorios, tanto en la tasa de aciertos como en la probabilidad de estimación correcta del período constructivo. Respecto al primero de los factores, la tasa de verdaderos positivos obtenidos por los bosques aleatorios osciló entre un 99 % y un 100 %, mientras que en los perceptrones multicapa se obtuvo una disminución en la tasa de acierto que osciló entre un 87,36 % y un 99,24 %. Por lo tanto, aunque los valores fueron adecuados en los dos planteamientos, los bosques aleatorios obtuvieron un ajuste óptimo, por lo que destaca su empleo con respecto a los perceptrones multicapa. Asimismo, la probabilidad de realizar una estimación correcta del período constructivo es mayor en los modelos de bosques aleatorios, tal y como se refleja a través del área bajo la curva ROC obtenida.

Por consiguiente, los resultados reflejan las posibilidades de estimación de estas dos variables con objeto de automatizar y eliminar errores en los procesos de caracterización térmica. La utilización tanto del perceptrón multicapa como de los bosques aleatorios obtendrían resultados válidos, aunque estos últimos fueron los que tuvieron asociados una mayor exactitud en las estimaciones. Además, cabe destacar el ahorro de tiempo computacional requerido para el desarrollo de los bosques aleatorios con respecto a los perceptrones multicapa.

Así pues, los modelos de bosques aleatorios se pueden usar como una metodología auxiliar de evaluación de la transmitancia térmica antes de caracterizar la transmitancia térmica de los métodos experimentales. Con el valor de referencia obtenido a través de los bosques aleatorios se puede comprobar si los resultados experimentales son coincidentes o no. En el caso de que hubiera una desviación superior al 20 % entre ambos valores, se constataría que el ensayo se realizó en condiciones poco adecuadas o que hubo algún tipo de error en la medición realizada por las sondas.

Finalmente, y para que el lector disponga de una visualización del acoplamiento de las diferentes metodologías de optimización y de automatización desarrolladas, en la Figura 43 se muestra un flujo de trabajo empleando las dos tipologías de modelos diseñadas. Este flujo de trabajo automatiza todo el proceso de análisis para la caracterización térmica de cerramientos, de manera que se eliminan las posibilidades de error de cada cálculo. El flujo de trabajo representado en la Figura 43 corresponde a una aplicación de los modelos para el método termométrico. En el caso del método termoflujométrico, solo el modelo de bosques aleatorios sería de aplicación para estimar la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007.

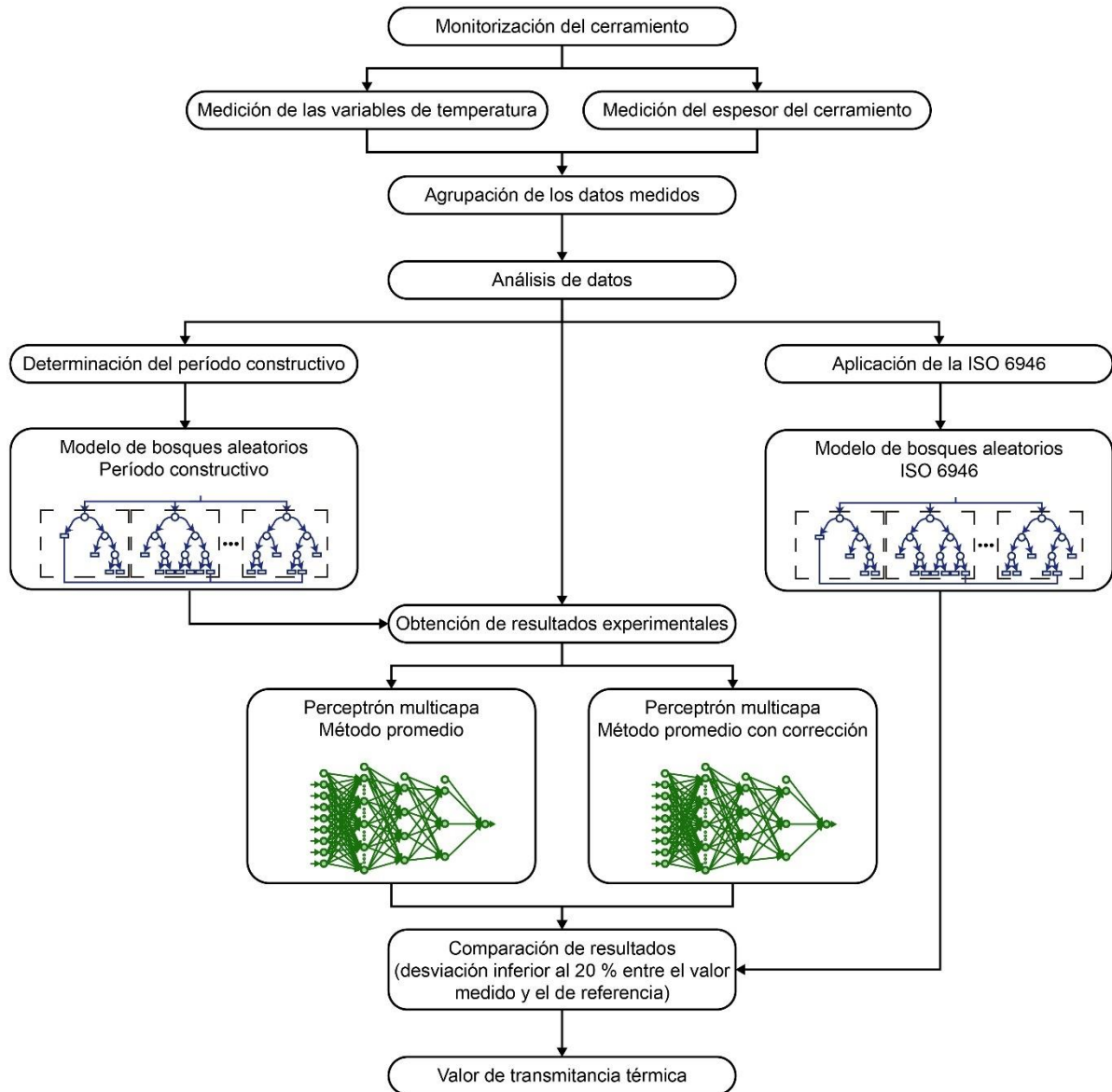


Figura 43. Flujo de aplicación de los modelos de aprendizaje automático desarrollados. Fuente: propia.

8. Conclusiones

La principal aportación de esta tesis es la revisión y el análisis de los métodos de caracterización de la transmitancia térmica que mayores brechas de conocimiento presentaban. En primer lugar, se realizaron una serie de investigaciones con el fin de contextualizar y dar una mayor relevancia a la influencia que tiene la transmitancia térmica tanto en el consumo energético de los edificios como en las condiciones de habitabilidad. Estos estudios pusieron de manifiesto que las variaciones de las propiedades térmicas de la envolvente pueden tener efectos significativos en estos dos aspectos.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis exhaustivo en la literatura científica de los métodos de caracterización experimental de la transmitancia térmica en cerramientos existentes. Como resultado, se observaron las siguientes debilidades de los métodos experimentales:

- La falta de consenso en los métodos de termografía infrarroja cuantitativa a efectos de formulación. Así pues, determinar la correlación de convección, tanto exterior como interior, que mejor se adapte a estos métodos constituía uno de los aspectos más prioritarios del análisis del método.
- La falta de investigaciones relacionadas con las limitaciones y las posibilidades de aplicación del método termométrico, así como con el desarrollo de nuevos procedimientos de análisis de datos basados en las variables obtenidas con el método.
- Las limitaciones de aplicación de la ISO 6946:2007 en cerramientos existentes al necesitar conocer las capas que componen el cerramiento. Por tanto, analizar la posibilidad de utilizar nuevas metodologías de análisis de datos que estimen los resultados de la ISO 6946:2007 a través de variables monitorizadas dotaría de una mayor aplicabilidad del método.

Mediante la realización de una serie de campañas experimentales, procesos de simulación y aplicación de técnicas estadísticas avanzadas, se han podido abordar las principales limitaciones que presentaban los métodos experimentales. Estas investigaciones estuvieron estructuradas en cada uno de los puntos indicados anteriormente.

Con respecto al análisis del término convectivo en los métodos cuantitativos de termografía infrarroja, se detectó que el lugar de realización del ensayo (exterior o interior), el planteamiento de análisis de datos y el término convectivo influyen de manera considerable en los resultados.

En los casos de los métodos de exterior, las expresiones analizadas para los coeficientes de transferencia de calor convectiva externa correlacionadas con la velocidad del viento mostraron un conjunto de resultados diferenciados en función del tipo de ensayo y del planteamiento adoptado. En este sentido, se destacan los siguientes aspectos:

- Para el enfoque de convección, se consiguieron resultados válidos en los 3 tipos de cerramientos analizados con las ecuaciones de Watmuff et al. (Ecuación (49)), de Lunde (Ecuación (52)), de la ISO 6946:2007 (Ecuación (67)) y de Liu y Harris (Ecuaciones (72) y (73)).
- Para el enfoque de convección y de radiación, las ecuaciones que pertenecen a los clústeres “a”, “b”, “c”, “e”, “f”, “g”, “h”, “k”, “l” y “o” obtuvieron resultados válidos en el

cerramiento sin aislamiento, mientras que el uso de ecuaciones de los clústeres “r”, “s” y “t” obtuvo resultados válidos en paredes con aislamiento.

- Para el enfoque de convección simplificada y de radiación, se alcanzaron resultados válidos en paredes sin aislamiento o con aislamiento de pequeño espesor. Además, los resultados fueron similares entre las diferentes ecuaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo externo cuando la velocidad del viento fue baja.

No obstante, el índice de repetibilidad de resultados válidos de estas ecuaciones no fue elevado. Asimismo, el uso de la velocidad promedio del viento o de la velocidad del viento medida en cada instante como variable de entrada en el procedimiento de cálculo modificó significativamente los resultados de transmitancia térmica logrados en cada ensayo. Por tanto, se consiguió una variación mayor en los resultados de aquellas pruebas en las que la desviación presentada por la velocidad instantánea del viento fue alta con respecto al valor medio.

De los enfoques adimensionales, ninguno de los coeficientes de transferencia de calor convectivo externo analizados consiguió resultados representativos para el enfoque de convección, mientras que el enfoque de convección y de radiación obtuvo resultados representativos en dos de los ensayos, con un comportamiento similar al enfoque simplificado de Albatizi y Tonelli.

Así pues, dadas estas variaciones en los distintos planteamientos y a la baja repetibilidad de los resultados, no fue posible establecer un coeficiente o un enfoque adecuado para utilizar estas correlaciones en el método externo.

Respecto a los métodos de interior, las diversas expresiones analizadas se caracterizaron por mostrar una mayor robustez. En primer lugar, en el planteamiento de convección, las correlaciones de diferencias de temperatura con un alto flujo de convección tuvieron asociado un mayor número de resultados representativos, mientras que, en el planteamiento de convección y radiación, fueron las ecuaciones de Alamdari y Hammond (Ecuación (93)), de Min et al. (Ecuación (86)), de Holman (Ecuación (98)) y de Fohanno y Polidori (Ecuación (106)) las que consiguieron resultados válidos en los 3 muros analizados. Sin embargo, las correlaciones de números adimensionales fueron las que obtuvieron un mayor número de resultados representativos. En este sentido, de las 20 ecuaciones analizadas, solo una de ellas no logró resultados representativos, mientras que el resto se caracterizó por alcanzar resultados ajustados en la gran mayoría de los ensayos.

Por lo tanto, los resultados reflejaron la conveniencia del empleo de los métodos de interior con correlaciones de números adimensionales como la metodología más adecuada para aplicar el método de termografía infrarroja cuantitativa. Estos resultados van en consonancia con las últimas investigaciones acerca del método llevadas a cabo por Tejedor et al. (2017, 2018) en relación con la utilización de números adimensionales, y permiten marcar la línea de desarrollo del método para próximas investigaciones.

En relación a las investigaciones de análisis y optimización del método termométrico, el primero de los análisis relacionado con la aplicación del procedimiento clásico del método determinó que existe la posibilidad de evaluar la transmitancia térmica en diferentes tipologías de cerramiento, siempre que se reúnan tres condicionantes: realización del ensayo con unas condiciones de gradiente térmico elevado, utilización de instrumental adecuado y realización de un procesado posterior de los datos. En los ensayos en los que se reunieron estos 3 condicionantes, los resultados fueron satisfactorios, con un grado de desviación bajo. En el caso del gradiente térmico, la consideración de un gradiente térmico de 5 °C puede permitir la realización del ensayo con un grado de exactitud adecuado en los resultados, siempre que haya un gran número de registros cumpliendo esta condición. Por consiguiente, se garantiza la

utilización del método en regiones climáticas cálidas como las del mediterráneo. Sin embargo, la realización del ensayo con un gradiente térmico elevado (p. ej., mayor de 10 °C) asegura una mayor estabilidad de las medidas instantáneas en torno al valor representativo del cerramiento.

El análisis del método termométrico prosiguió con la aplicación del procedimiento de corrección de almacenamiento de calor de la ISO 9869-1:2014 en el método termométrico basándose en el empleo de perceptrones multicapa. Los resultados reflejaron que el diseño considerado constituye un planteamiento adecuado para realizar el procedimiento de cálculo, debido, entre otros factores, a las características propias del procedimiento de cálculo, en el que resulta necesario conocer las propiedades térmicas de las capas para su aplicación y en el que influyen más los espesores y las conductividades térmicas de las capas que su ubicación. En este sentido, en cerramientos con aislamiento en algunas de sus capas, la determinación del grosor de este material condujo a variaciones de entre el 6,10 % y el 7,67 % de la transmitancia térmica corregida, mientras que las diferencias causadas por el tipo de material existente en esa capa estuvieron entre el 0,50 % y el 2,55 % (debido a la similitud en las propiedades térmicas de los principales materiales aislantes más utilizados).

Con respecto a las estimaciones realizadas por el perceptrón multicapa en el procedimiento corrector, se obtuvieron resultados válidos en los ensayos de los tres períodos constructivos examinados, con desviaciones inferiores al 20 % entre el valor medido y el esperado. La duración del ensayo requerida para cada cerramiento varió en función de la resistencia térmica y de las variaciones de la temperatura exterior. En este sentido, se consiguieron resultados válidos en 2 días en el cerramiento del período 2, mientras que fue necesario extender la prueba a 4 días en el cerramiento del período 3. Por lo tanto, el modelo de análisis de datos propuesto conduce a lograr resultados válidos en períodos de tiempo más cortos que los recomendados en varias investigaciones. Asimismo, el perceptrón multicapa no necesita un procesamiento posterior de datos para alcanzar resultados representativos (optimizando la velocidad del procedimiento de cálculo), aunque el procesamiento posterior redujo el porcentaje de error hasta en un 4,55 %.

Sin embargo, una de las principales limitaciones del método termométrico se debe a la utilización de un valor teórico para el coeficiente de transferencia de calor total interior. Al contrario que el método de la ISO 9869-1:2014, no se realiza una caracterización exacta del flujo de calor, de manera que puede provocar desviaciones significativas cuando la caracterización del cerramiento no se realiza en las condiciones establecidas para el valor teórico empleado en el método termométrico. Para eliminar esta aportación de error del método, se diseñaron perceptrones multicapa para estimar la transmitancia térmica de los diferentes enfoques sugeridos en la ISO 9869-1:2014 (el método promedio y el método promedio con corrección para los efectos de almacenamiento), de manera que se obtienen resultados ajustados según el procedimiento de la norma, pero siguiendo el esquema de funcionamiento del método termométrico.

A tenor de los resultados obtenidos en un conjunto de 22.820 ensayos, se concluye que la aplicación de los perceptrones multicapa es efectiva. Con esta nueva metodología se realizaron estimaciones ajustadas con respecto a los valores de transmitancia térmica conseguidos mediante el método promedio de la ISO 9869-1:2014 (en estos casos, el coeficiente de determinación fue siempre superior al 98 %). Respecto a las estimaciones que utilizan el enfoque de corrección de la ISO 9869-1:2014, se consiguieron resultados similares con el mismo número de datos. Sin embargo, para este enfoque, el uso de arquitecturas más complejas no mejoró de manera cuantiosa las estimaciones.

El análisis del peso de las variables de entrada determinó que las variables resultantes de la monitorización afectaron considerablemente la precisión de los modelos, mientras que el espesor y la duración del ensayo tuvieron una menor influencia. El período constructivo también tuvo un impacto significativo en el rendimiento de los modelos, alcanzando errores

promedio que oscilaban entre $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y $0,83 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Por lo tanto, se evaluó el uso de perceptrones multicapa diseñados especialmente para cada período constructivo. El uso de estos nuevos modelos aumentó el ajuste en las estimaciones de transmitancia térmica realizadas con respecto a las de los modelos completos (es decir, los modelos diseñados para todos los períodos constructivos). El uso de modelos individuales es una oportunidad para lograr resultados más precisos, lo que garantiza que la metodología se extrapola a otras regiones de acuerdo con sus tipologías y períodos de construcción. Las limitaciones de la metodología propuesta se centran en la necesidad de tener un gran conjunto de datos y representativo para desarrollar perceptrones multicapa.

Finalmente, el último de los estudios estuvo orientado a determinar la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 con el objeto de una aplicación más fluida del procedimiento de validación de los métodos experimentales recogido en el punto 7.3. de la ISO 9869-1:2014. Además, en este estudio se planteó determinar el período constructivo del cerramiento, cuya necesidad derivó de los planteamientos de investigaciones anteriores realizadas en la tesis. Para ello, se utilizaron las variables medidas a través de los métodos termoflujométrico y termométrico, así como dos algoritmos de aprendizaje automático: los bosques aleatorios y los perceptrones multicapa.

Como resultado, se determinó que los bosques aleatorios tuvieron un rendimiento eficiente para la determinación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007 y del período constructivo. Por un lado, en el caso de la determinación de la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007, los modelos realizaron estimaciones con un coeficiente de determinación superior al 99,55 % con respecto a los valores reales. Por otro lado, más de 5000 de los ensayos analizados en la fase de testeo tuvieron errores en la estimación inferiores a $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. También, al comparar los bosques aleatorios con los perceptrones multicapa, se comprobó que, aunque los perceptrones multicapa tuvieron un buen rendimiento, los bosques aleatorios constituyeron la tipología de algoritmo más adecuada para determinar la transmitancia térmica de la ISO 6946:2007. Esta misma tendencia se detectó en el planteamiento para determinar el período constructivo del cerramiento.

Asimismo, se estableció el potencial que presenta la utilización de los algoritmos de aprendizaje automático. Los buenos resultados de los diferentes estudios, tanto con la aplicación de los perceptrones multicapa como de los bosques aleatorios, plantean la posibilidad de una mayor aplicación de estas técnicas para resolver problemas de caracterización térmica. En este sentido, en la literatura científica existían pocos estudios que aplicaban estas técnicas para abordar la caracterización térmica de algún elemento de la envolvente.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta tesis podrían ser útiles para que los arquitectos, los auditores energéticos, los arquitectos técnicos y los ingenieros caractericen la transmitancia térmica de las fachadas en los edificios existentes. Además, los resultados son útiles para que estos técnicos dispongan de nuevos recursos para garantizar la propuesta de medidas de ahorro energético más adecuadas mediante una caracterización correcta de las prestaciones térmicas de la envolvente de los edificios existentes. Con todo ello, se facilitaría una tasa más alta de renovación energética del parque inmobiliario, así como el alcance de los objetivos internacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para mediados del siglo XXI.

8. Conclusions¹⁷

The main contribution of this thesis is the review and analysis of thermal characterization methods with the greatest knowledge gaps. Firstly, some research was done to provide a context and to give a greater importance to the influence of the thermal transmittance on building energy consumption and on habitability conditions. It was found that the variations presented by the thermal properties of the envelope could have significant effects on these two aspects.

Afterwards, the experimental characterization methods of the thermal transmittance in existing walls was fully analysed in the scientific literature. Some knowledge gaps were as follows:

- The lack of consensus on the quantitative infrared thermography methods for formulation. Therefore, determining the convection correlation, both external and internal, which best adapts to these methods constituted one of the main aspects of the analysis of the method.
- The lack of research studies on the limitations and possibilities of applying the thermometric method, as well as on the development of new procedures to analyse data based on the variables obtained with the method.
- The limitations to apply ISO 6946 in existing walls as the wall layers are required to be known. Analysing the possibility of using new data analysis methodologies to estimate the results of ISO 6946 through monitored variables would therefore provide a greater applicability of the method.

Several experimental campaigns and simulation processes, as well as the application of advanced statistical techniques, have tackled the main limitations of experimental methods. These research studies were structured based on the aspects previously mentioned.

In the analysis of the convective term in quantitative infrared thermography methods, it was found that the place where the test is performed (exterior or interior), the data analysis approach, and the convective term strongly affect the results.

As for external methods, the different expressions analysed for the external convective heat transfer coefficients correlated with wind speed obtained different results according to the test and to the approach adopted:

- For the convection approach, valid results were obtained in the 3 types of walls analysed with the equations of Watmuff et al. (Equation (49)), of Lunde (Equation (52)), of ISO 6946 (Equation (67)), and of Liu and Harris (Equations (72) and (73)).
- For the convection and radiation approach, the equations belonging to clusters “a”, “b”, “c”, “e”, “f”, “g”, “h”, “k”, “l”, and “o” obtained valid results in the wall without insulation, whereas the use of the equations of clusters “r”, “s”, and “t” obtained valid results in walls with insulation.
- For the simplified convection and radiation approach, valid results were obtained in walls without insulation or with insulation of low thickness. Also, similar results were obtained

¹⁷ En cumplimiento con los criterios necesarios para la mención de Doctorado Internacional, se redacta el Apartado 7 en lengua inglesa.

between the different equations of the external convective heat transfer coefficient when wind speed was low.

However, the index of repeatability of the valid results of these equations was low. Likewise, the use of the average wind speed or the wind speed measured in each instant as an input variable in the calculation procedure significantly modified the thermal transmittance results obtained in each test. According to this aspect, a greater variation was obtained in the results of those tests in which the deviation presented by the instantaneous wind speed was high with respect to the mean value.

As for adimensional approaches, none of the external convective heat transfer coefficients obtained representative results for the convection approach, whereas the convection and radiation approach obtained representative results in two tests, with a similar behaviour to the Albatici and Tonelli's simplified approach.

Given the differences in the various approaches and the low repetition of results, establishing an appropriate coefficient or approach to use these correlations in the external method was not possible.

As for the internal methods, the different expressions analysed were characterized by showing a greater robustness. Regarding the correlations of temperature differences in the convection approach, only those correlations characterizing a high convective flux obtained a larger number of representative results, whereas that, in the approach of convection and radiation, the equations of Alamdari and Hammond (Equation (93)), of Min et al. (Equation (86)), of Holman (Equation (98)), and of Fohanno and Polidori (Equation (106)) obtained valid results in the 3 walls analysed. However, the correlations of adimensional numbers obtained a larger number of representative results. In this regard, only 1 out of 20 equations analysed did not obtain representative results, and the rest obtained adjusted results in most tests.

The results showed therefore the advisability of using internal methods with the use of correlations of adimensional numbers as the most acceptable methodology to apply the quantitative infrared thermography method. These results are in accordance with the last research studies on the method carried out by Tejedor et al. (2017, 2018) in relation to the use of adimensional numbers and mark the development of the method for further research works.

Regarding the research studies on the analysis and optimization of the thermometric method, the first analysis related to the use of the classic procedure of the method determined that it is possible to determine thermal transmittance in different wall typologies as long as three determining factors are met: to perform the test with a high thermal gradient, to use adequate instruments, and to carry out a data post-processing. In the tests which meet such 3 determinants, the results were satisfactory, with a low degree of deviation. As for the thermal gradient, to consider a thermal gradient of 5 °C allows a test to be performed with an acceptable accuracy degree in the results obtained if there are many records which meet such condition, thus ensuring the use of the method in warm climate regions, such as the Mediterranean. However, a high thermal gradient (e.g., greater than 10 °C) ensures a greater stability of the instantaneous measurements near to the representative value of the wall.

The next step of the analysis of the thermometric method was the application of the procedure of heat storage correction from ISO 9869-1 in the thermometric method by using multilayer perceptrons. The results showed that the use of multilayer perceptrons in the design considered constitutes an acceptable approach to carry out the calculation procedure. The reason was based on, among other factors, the characteristics of the calculation procedure where the thermal properties of walls should be known to be applied and where thicknesses and thermal conductivities of layers affect more than their location. In this regard, in walls with insulation in some of their layers, the determination of the thickness of this material led to variations between

6.1 and 7.67 of the corrected thermal transmittance, whereas the differences due to the type of material existing in such layer were between 0.5 and 2.55% (because of the similarity in the thermal properties of the insulating materials mainly used).

Regarding the estimations carried out by the multilayer perceptron in the correction procedure, valid results were obtained in the tests of the three building periods considered and with deviations lower than 20% between the measured value and the expected value. The test duration required for each wall varied according to the thermal resistance and to the variations of the external temperature. In this sense, valid results were obtained in 2 days in the wall of the period 2, whereas the test was extended to 4 days in the wall of the period 3. The data analysis model leads therefore to obtain valid results in shorter periods of time than that recommended by several research studies. In addition, the multilayer perceptron does need a data post-processing to obtain representative results (optimizing the speed of the calculation procedure), although the post-processing reduced the error percentage up to 4.55%.

However, one of the main limitations of the thermometric method is the use of a theoretical value for the total internal heat transfer coefficient. Unlike the method from ISO 9869-1, the heat flux is not accurately characterized, thus leading to possible important deviations when the wall is not characterized under established conditions for the theoretical value used in the thermometric method. To remove this error, multilayer perceptrons were used to estimate the thermal transmittance of the various approaches from ISO 9869-1 (the average method and the average method with correction for storage effects), thus obtaining adjusted results based on the procedure of the standard but following the operation scheme of the thermometric method.

Based on the results obtained from a dataset of 22,820 tests, the effectiveness of this new methodology is concluded. The multilayer perceptrons carried out adjusted estimations with respect to the thermal transmittance values obtained with the average method from ISO 9869-1 (in these cases, the determination coefficient was always greater than 98%). Regarding the estimations using the correction approach from ISO 9869-1, similar results were obtained with the same number of data. For this approach, however, the use of more complex architectures did not significantly improve the estimations.

The analysis of the influence of the input variables determined that the variables resulting from the monitoring strongly affected the accuracy of the models, whereas the thickness and the test duration had a lower influence. The building period also influenced the performance of the models, achieving average errors oscillating between 0,39 and 0,83 W/(m²K). The use of multilayer perceptrons designed especially for each building period was therefore assessed. The use of these new models increased the adjustment in the estimations of thermal transmittance carried out with respect to that of the complete models (that is, the models designed for all building periods). The use of individual models constitutes an opportunity to achieve more accurate results, thus ensuring that the methodology is extrapolated to other regions according to their typologies and building periods. The limitations of the proposed methodology are focused on the need for having a large and representative dataset to develop multilayer perceptrons.

Finally, the last of the studies was focused on the determination of the thermal transmittance from ISO 6946 to better apply the validation procedure of the experimental methods set up in section 7.3. from ISO 9869-1. Likewise, the determination of the building period of the wall was also considered as the approaches of previous research studies carried out in the thesis showed its importance. The building period of the wall was determined by using variables measured with both the heat flow meter method and the thermometric method, as well as with two different automatic learning algorithms: random forests and multilayer perceptrons.

As a result, random forests had an effective performance to determine the thermal transmittance from ISO 6946 and the building period. On the one hand, in the case of

determining the thermal transmittance from ISO 6946, the models carried out estimations with a determination coefficient greater than 99.55% with respect to the actual values. On the other hand, more than 5,000 of the tests analysed in the testing phase had errors in the estimation lower than 0,05 W/(m²K). Also, the comparison of random forests with multilayer perceptrons proved that, although the multilayer perceptrons had a good performance, the random forests were the most acceptable algorithm to determine the thermal transmittance from ISO 6946. This same tendency was found in the approach to determine the building period of the wall.

In addition, the potential presented using automatic learning algorithms was established. The good results obtained in the different studies, by using both multilayer perceptrons and random forests, make possible a greater application of these techniques to solve thermal characterization problems. In this sense, there were not many research studies in the scientific literature applying these techniques to tackle the thermal characterization of a particular envelope element.

Finally, the results obtained in this thesis could be useful for energy auditors, architects, and engineers to characterize the thermal transmittance of façades in existing buildings. In this regard, the results are useful to provide technicians with new resources to ensure the proposal of the most appropriate energy saving measures by adequately characterizing the thermal properties of the envelope of the existing buildings. In this way, a higher energy renovation rate of the building stock would be facilitated, as well as the achievement of the international goals based on the reduction of greenhouse gas emissions by mid-21st century.

8. Conclusioni¹⁸

Il contributo principale di questa tesi è la revisione e l'analisi dei metodi di caratterizzazione della trasmittanza termica che presentavano notevoli lacune in termini di conoscenze. Per questo, in primo luogo, una serie di ricerche sono state condotte per contestualizzare e dare maggiore rilevanza all'influenza della trasmittanza termica sia sul consumo energetico degli edifici che sulle condizioni di abitabilità. Da questi studi è emerso che le variazioni che possono presentare le proprietà termiche dell'involucro possono avere effetti significativi in questi due aspetti.

Successivamente, nella letteratura scientifica è stata effettuata un'analisi esauriente dei metodi per la caratterizzazione sperimentale della trasmittanza termica negli involucri esistenti. Da questo studio sono emerse le seguenti lacune di conoscenza:

- La mancanza di consenso nei metodi di termografia quantitativa a infrarossi a effetti di formulazione. Così, la determinazione della correlazione convettiva, sia esterna che interna, che meglio si adatta a questi metodi era uno degli aspetti più prioritari dell'analisi dei metodi.
- La mancanza di ricerche sui limiti e sulle possibilità dell'applicazione del metodo termometrico, e lo sviluppo di nuovi procedimenti di analisi di dati basati nelle variabili ottenute con il metodo.
- Le limitazioni di applicazione della ISO 6946 negli involucri esistenti quando è necessario conoscere gli strati che compongono l'involucro. Pertanto, analizzare la possibilità di utilizzare nuove metodologie di analisi dei dati che consentano di stimare i risultati della ISO 6946 attraverso variabili monitorate consentirebbe una maggiore applicabilità del metodo.

Attraverso una serie di campagne pilota, processi di simulazione e l'applicazione di tecniche statistiche avanzate, è stato possibile affrontare le principali limitazioni dei metodi sperimentali. Tali indagini sono state strutturate in ciascuno dei punti citati precedentemente.

Per quanto riguarda l'analisi del termine convettivo nei metodi quantitativi di termografia a infrarossi, è stato rilevato che il luogo di esecuzione della prova (esterno o interno) l'approccio dell'analisi dei dati e il termine convettivo hanno un'influenza significativa sui risultati ottenuti.

Nel caso di metodi all'aperto, le diverse espressioni analizzate per i coefficienti esterni di trasferimento convettivo del calore correlati alla velocità del vento hanno ottenuto risultati diversi a seconda della prova e dell'approccio adottato:

- Per l'approccio alla convezione, risultati validi sono stati ottenuti nei 3 tipi di involucri analizzati con le equazioni di Watmuff et al. (Equazione (49)), Lunde (Equazione (52)), ISO 6946 (Equazione (67)), e Liu e Harris (72) e (73).
- Per l'approccio di convezione e radiazione, le equazioni appartenenti ai cluster "a", "b", "c", "e", "f", "g", "h", "k", "l" e "o" ha ottenuto risultati validi nell'involucro senza isolamento, mentre l'uso di equazioni dei cluster "r", "s" e "t" ha ottenuto risultati validi in pareti con isolamento.

¹⁸ En cumplimiento con los criterios necesarios para la mención de Doctorado Internacional, se redacta el Apartado 7 en lengua italiana.

- Per l'approccio di convezione semplificata e di radiazione, risultati validi sono stati ottenuti su pareti senza isolamento o con isolamento di piccolo spessore. Inoltre, risultati simili sono stati ottenuti tra le diverse equazioni del coefficiente esterno di trasferimento convettivo del calore quando la velocità del vento era bassa.

Tuttavia, l'indice di ripetibilità dei risultati validi di queste equazioni era basso. Inoltre, l'uso della velocità media del vento o della velocità del vento misurata ad ogni istante come variabile di ingresso nella procedura di calcolo ha modificato in modo significativo i risultati della trasmissione termica ottenuti ad ogni prova. In base a ciò, si è ottenuta una variazione maggiore nei risultati delle prove in cui la deviazione rappresentata dalla velocità istantanea del vento era elevata rispetto al valore medio.

Da approcci adimensionali, nessuno dei coefficienti convettivi di trasferimento termico esterni analizzati ha ottenuto risultati rappresentativi per l'approccio alla convezione, mentre l'approccio a convezione e radiazione ha permesso di ottenere risultati rappresentativi in due delle prove, con un comportamento simile all'approccio semplificato di Albatici e Tonelli.

Pertanto, date queste differenze nei diversi approcci e la bassa ripetibilità dei risultati ottenuti, non è stato possibile stabilire un coefficiente o un metodo adeguato a utilizzare tali correlazioni nel metodo esterno.

Nel caso dei metodi indoor, le diverse espressioni analizzate sono state caratterizzate da una maggiore robustezza. Nel caso di correlazioni di differenze di temperatura nell'approccio di convezione, solo quelle correlazioni che caratterizzano un elevato flusso di convezione sono quelle che hanno ottenuto un maggior numero di risultati rappresentativi, mentre, nell'approccio di convezione e radiazione, erano le equazioni di Alamdari e Hammond (Equazione (93)), Min et al. (Equazione (86)), Holman (Equazione (98)) e Fohanno e Polidori (Equazione (106)) che hanno ottenuto risultati validi nelle tre pareti analizzate. Tuttavia, le correlazioni di numeri adimensionali sono stati quelli che hanno ottenuto il maggior numero di risultati rappresentativi. In questo senso, delle 20 equazioni analizzate, solo una di esse non ha ottenuto risultati rappresentativi, ed il resto è stato caratterizzato dall'ottenimento di risultati corretti nella grande maggioranza dei test effettuati.

I risultati hanno pertanto rispecchiato l'opportunità di utilizzare metodi indoor con l'uso di correlazioni numeriche adimensionali come metodo quantitativo a infrarossi più appropriato per l'applicazione del metodo quantitativo termografico a infrarossi. Questi risultati sono in linea con le più recenti ricerche sul metodo svolto da Tejedor et al. (2017, 2018) in relazione all'uso di numeri adimensionali e consentono di marcare la linea di sviluppo dei metodi per la ricerca futura.

Per quanto riguarda la ricerca sull'analisi e l'ottimizzazione del metodo termometrico, la prima delle analisi relative all'uso della procedura classica del metodo ha determinato che esiste la possibilità di determinare la trasmittanza termica in diversi tipi di involucri ogni volta che soddisfano tre condizionatori: esecuzione della prova in condizioni ad alto gradiente termico, con strumentazione appropriata, e successiva elaborazione dei dati. Nelle prove in cui sono state raccolte queste tre condizioni, i risultati ottenuti sono stati soddisfacenti e con un basso grado di deviazione. Nel caso del gradiente termico, è stato rilevato che l'esame di un gradiente termico di 5 °C può consentire di eseguire la prova con un grado di precisione adeguato nei risultati ottenuti, purché vi sia un gran numero di registrazioni che soddisfano questa condizione. Ciò consente di garantire l'utilizzo del metodo nelle regioni a clima caldo come quelle del Mediterraneo. Tuttavia, l'uso di un gradiente termico più elevato (ad es. superiore a 10 °C) garantisce una maggiore stabilità delle misurazioni istantanee intorno al valore rappresentativo del locale.

L'analisi del metodo termometrico è proseguita con l'applicazione della procedura di correzione dell'accumulo di calore della norma ISO 9869-1 nel metodo termometrico basato sull'uso di percettroni multistrato. I risultati hanno evidenziato come l'uso di percettroni multistrato con il progetto in esame costituisca un approccio appropriato per la procedura di calcolo. Ciò è dovuto, tra l'altro, alle caratteristiche della procedura di calcolo, quando le proprietà termiche degli strati sono necessarie per la loro applicazione e sono influenzate più dagli spessori termici e dalle conduttività degli strati che dalla loro ubicazione. In questo senso, negli involucri con isolamento in alcuni dei loro strati, la determinazione dello spessore di questo materiale ha portato a variazioni tra il 6,1% e il 7,67% della trasmissione termica corretta, mentre le differenze dovute al tipo di materiale in quello strato erano tra 0,5% e 2,55% (a causa della somiglianza nelle proprietà termiche dei principali materiali isolanti comunemente usati).

Per quanto riguarda le stime effettuate dal percettrone multistrato nella procedura correttiva, risultati validi sono stati ottenuti nelle prove dei tre periodi di costruzione considerati e con deviazioni inferiori al 20% tra il valore misurato e il valore atteso. La durata della prova richiesta per ciascun locale varia a seconda della resistenza termica e delle variazioni della temperatura esterna. In questo senso, sono stati ottenuti risultati validi in 2 giorni nell'involucro del periodo 2 mentre era necessario estendere la prova a 4 giorni nell'involucro del periodo 3. Pertanto, il modello di analisi dei dati proposto porta a risultati validi in periodi di tempo più brevi di quelli raccomandati da più indagini. Inoltre, il percettrone multistrato non necessita di ulteriori elaborazioni di dati per ottenere risultati rappresentativi (ottimizzando la velocità della procedura di calcolo), anche se un'ulteriore elaborazione ha ridotto il tasso di errore fino al 4,55%. Tuttavia, una delle principali limitazioni del metodo termometrico è dovuta all'uso di un valore teorico per il coefficiente di trasferimento termico interno totale. A differenza del metodo ISO 9869-1, non esiste una caratterizzazione precisa del flusso termico. Ciò può causare deviazioni significative quando la caratterizzazione dell'involucro non viene effettuata nelle condizioni stabilite per il valore teorico utilizzato nel metodo termometrico. Per eliminare questo contributo di errore del metodo, si è deciso di utilizzare i percettroni multistrato per stimare la trasmittanza termica dei diversi approcci suggeriti nella ISO 9869-1 (metodo medio e metodo medio con correzione per gli effetti di stoccaggio). Ne risultano risultati corretti basati sulla procedura della norma, ma secondo lo schema operativo del metodo termometrico.

Sulla base dei risultati ottenuti da una serie di dati di 22820 studi, l'efficacia di questa nuova metodologia può essere conclusa. I percettroni multistrato hanno effettuato stime corrette dei valori di trasmittanza termica ottenuti con il metodo medio ISO 9869-1 (in questi casi il coefficiente di determinazione era sempre superiore al 98%). Per le stime che utilizzano l'approccio di correzione ISO 9869-1, risultati simili sono stati ottenuti utilizzando lo stesso numero di dati. Tuttavia, per questo approccio, l'uso di architetture più complesse non ha migliorato significativamente le stime.

L'analisi dell'influenza delle variabili di input ha determinato che le variabili risultanti dal monitoraggio hanno fortemente influenzato l'accuratezza dei modelli, mentre lo spessore e la durata della prova hanno avuto un'influenza minore. Il periodo di costruzione ha influenzato anche le prestazioni dei modelli, raggiungendo errori medi che vanno da 0,39 a 0,83 W/(m²K). Pertanto, è stato valutato l'uso di percettroni multistrato appositamente progettati per ogni periodo di costruzione. L'uso di questi nuovi modelli ha aumentato la regolazione delle stime di trasmittanza termica effettuate rispetto a quelle dei modelli completi (cioè, modelli progettati per tutti i periodi di costruzione). L'uso di modelli individuali è un'opportunità per ottenere risultati più precisi, che garantisce che la metodologia venga estrapolata ad altre regioni in base alle loro tipologie e ai loro tempi di costruzione. I limiti della metodologia proposta si concentrano sulla necessità di disporre di un insieme di dati ampio e rappresentativo per sviluppare percettroni a più livelli.

Infine, l'ultimo studio si è incentrato sulla determinazione della trasmittanza termica della norma ISO 6946 al fine di applicare più agevolmente la procedura di convalida dei metodi sperimentali

di cui al punto 7.3. della norma ISO 9869-1. Questo studio ha anche preso in considerazione la determinazione del periodo di costruzione dello stabulario, la cui necessità deriva dalle precedenti proposte di ricerca contenute nella tesi. Ciò è stato fatto utilizzando le variabili misurate con i metodi termoflussometrici e termometrici Thermoflow e con due diversi algoritmi di apprendimento automatico: foreste casuali e perceptron multistrato.

Sulla base dei risultati ottenuti, è stato possibile determinare che le foreste casuali avevano una resa efficiente per la determinazione della norma ISO 6946 e del periodo di costruzione. Da un lato, nel caso della determinazione della trasmittanza termica della ISO 6946, i modelli hanno effettuato stime con un coefficiente di determinazione superiore al 99,55% rispetto ai valori reali. D'altra parte, più di 5000 delle prove analizzate nella fase di prova presentavano errori di stima inferiori a $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Inoltre, un confronto tra foreste casuali e perceptron multistrato ha mostrato che, sebbene i perceptron multistrato avessero un buon rendimento, le foreste casuali costituivano la tipologia algoritmica più appropriata per la determinazione della trasmittanza termica della norma ISO 6946. Questa stessa tendenza è stata rilevata nell'approccio per la determinazione del periodo costruttivo dell'involucro.

Dai risultati ottenuti nella ricerca svolta in questa tesi, è possibile stabilire il potenziale rappresentato dall'uso degli algoritmi di apprendimento automatico. I buoni risultati ottenuti nei diversi studi, sia con l'applicazione di perceptron multistrato che con foreste casuali, aumentano la possibilità di ulteriore applicazione di queste tecniche per risolvere i problemi di caratterizzazione termica. In questo senso, nella letteratura scientifica ci sono stati pochi studi che hanno applicato queste tecniche per affrontare la caratterizzazione termica di un elemento specifico dell'involucro.

Infine, i risultati ottenuti in questa tesi potrebbero essere utili per gli esperti in materia di audit energetico, architetti, architetti tecnici e ingegneri per caratterizzare la trasmissione termica delle facciate negli edifici esistenti. In questo senso, i risultati sono utili affinché questi tecnici abbiano nuove risorse per garantire la proposta di misure di risparmio energetico più appropriate attraverso una adeguata caratterizzazione delle prestazioni termiche dell'involucro di esistenti edifici. Ciò faciliterebbe un più elevato tasso di riqualificazione energetica del parco immobiliare e il raggiungimento degli obiettivi internazionali per ridurre le emissioni di gas a effetto serra entro la metà del XXI secolo.

9. Futuras líneas

Entre las futuras líneas de investigación se considera que puede tener especial interés para la comunidad científica profundizar en el análisis de las prestaciones térmicas de otros elementos de la envolvente, tales como la cubierta, las ventanas o los elementos en contacto con el terreno. Estos elementos presentan un menor número de investigaciones relacionadas con su caracterización térmica. Así pues, los principios fundamentales de los métodos experimentales de fachadas se deben extrapolar y adaptar en función de las características propias de cada elemento.

Otra de las posibles futuras líneas consiste en la exportación de los métodos experimentales analizados en esta tesis a otros procesos constructivos. En este sentido, determinadas construcciones, como las de tipo naval, presentan características similares de condiciones de confort térmico y de consumo energético en sus zonas habilitadas. Así pues, diseñar metodologías que caractericen los elementos constructivos utilizados en sus envolventes permitiría disponer de instrumentos de control de calidad de las construcciones realizadas y garantizaría un menor impacto ambiental de estas construcciones.

En relación con el impacto ambiental, existe un principio fundamental para todos los métodos experimentales y sobre el que se ha incidido varias veces a lo largo de la tesis: la realización de los ensayos con un gradiente térmico elevado, ya que garantiza que se realicen en unas condiciones cuasi estacionarias. Sin embargo, resulta necesario la utilización de sistemas de climatización configurados con unas temperaturas de consigna exigentes, los cuales generan un gran consumo energético y un sobrecoste para las familias de las viviendas. Este último aspecto puede ser significativo si los ensayos se realizan en casas de familias con bajos recursos económicos. Por lo tanto, se plantea también como futuras líneas de investigación el análisis del impacto ambiental asociado a los ensayos, así como el desarrollo de nuevos dispositivos y procedimientos que garanticen la realización del ensayo con un gradiente térmico elevado y con un consumo energético bajo.

Además, otras tipologías de variables térmicas permiten analizar aspectos no valorados del rendimiento energético de los edificios. En este sentido, el conjunto de variables térmicas periódicas definidas en la ISO 13786:2017 (tales como la transmitancia térmica periódica, la capacidad térmica superficial o la admitancia térmica) determina el rendimiento de los cerramientos ante variaciones sinusoidales de la temperatura externa del aire, las cuales generan flujos de calor en la envolvente y variaciones de la temperatura interior. Para determinar estas variables, se detectan las mismas limitaciones que en la ISO 6946:2007 al requerir el conocimiento de las propiedades térmicas de las capas del elemento analizado. Así pues, el estudio de la utilización de algoritmos de aprendizaje automático para caracterizar estas variables en cerramientos existentes se debe considerar como una futura línea de investigación dentro del marco de la tesis.

Finalmente, se plantea el análisis de las opciones de transferencia del conocimiento obtenido en los sectores productivos mediante el desarrollo de herramientas y aplicaciones informáticas. Este aspecto se podría abordar a través de estudios relacionados con el grado de recibimiento y de utilización de estas herramientas por parte de la comunidad profesional de los arquitectos, los arquitectos técnicos y los ingenieros encargados de la mejora energética de los edificios.

10. Bibliografía

- Adhikari, R., Lucchi, E., & Pracchi, V. (2012). Experimental measurements on thermal transmittance of the opaque vertical walls in the historical buildings. In *PLEA2012 Conference, Opportunities, Limits and Needs Towards an environmentally responsible architecture*.
- AENOR. (1996). *UNE-EN ISO 7345:1996. Aislamiento térmico. Magnitudes físicas y definiciones*.
- Ahmad, A., Maslehuddin, M., & Al-Hadhrami, L. M. (2014). In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls. *Energy and Buildings*, *84*, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.048>
- Ahvenainen, S., Kokko, E., & Aittomäki, A. (1980). Thermal conductance of wall structures. *NASA STI/Recon Technical Report N*, *82*.
- Aittomäki, A. (1972). *Determination of the Overall Heat Transfer Coefficient of Multilayer Structures under Non-Steady Conditions*.
- Al-Arabi, M., & Sakr, B. (1988). Natural convection heat transfer from inclined isothermal plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *31*(3), 559–566. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(88\)90037-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(88)90037-3)
- Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., & Al-Hussain, S. N. (2012). Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Applied Energy*, *89*(1), 430–442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.009>
- Alamdari, F., & Hammond, G. P. (1983). Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. *Building Services Engineering Research and Technology*, *4*(3), 106–112. <https://doi.org/10.1177/014362448300400304>
- Albatici, R., Passerini, F., Tonelli, A. M., & Gialanella, S. (2013). Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. *Energy and Buildings*, *66*, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.004>
- Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2008). On site evaluation of U-value of opaque building elements: a new methodology. In *PLEA 2008 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.
- Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, *42*(11), 2177–2183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.010>
- Albatici, R., Tonelli, A. M., & Chiogna, M. (2015). A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. *Applied Energy*, *141*, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.035>
- Anderlind, G. (1992). Multiple regression analysis of in situ thermal measurements—Study of an attic insulated with 800 mm loose fill insulation. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, *16*(1), 81–104.
- Anderlind, G. (1996). *Dynamic Thermal Models*.
- Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. Á., & Gómez Melgar, S. (2017). A new metre for cheap, quick, reliable and simple thermal transmittance (U-Value) measurements in buildings. *Sensors*, *17*(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s17092017>

- Arpino, F., Dell'Isola, M., Ficco, G., Iacomini, L., & Fericola, V. (2011). Design of a calibration system for heat flux meters. *International Journal of Thermophysics*, 32(11–12), 2727–2734. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1054-3>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., De'Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2013). Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.052>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., Musto, M., & Vanoli, G. P. (2014). Experimental validation of a numerical code by thin film heat flux sensors for the resolution of thermal bridges in dynamic conditions. *Applied Energy*, 124, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.014>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2014). Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries: A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.04.004>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15220: Desempenho Térmico de edificações*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: edificações habitacionais: desempenho*.
- Assouline, D., Mohajeri, N., & Scartezzini, J. L. (2018). Large-scale rooftop solar photovoltaic technical potential estimation using Random Forests. *Applied Energy*, 217(February), 189–211. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.118>
- ASTM International. (2014a). ASTM E1862-14, Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers. <https://doi.org/10.1520/E1862-14>
- ASTM International. (2014b). ASTM E1933-14, Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. <https://doi.org/10.1520/E1933-14>
- ASTM International. (2015). ASTM C1060 - 11a, Standard practice for thermographic inspection of insulation instalations in envelope cavities of frame buildings. <https://doi.org/10.1520/C1060-11AR15>
- Atsonios, I. A., Mandilaras, I. D., Kontogeorgos, D. A., & Founti, M. A. (2017). A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls. *Energy and Buildings*, 154, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.064>
- Atsonios, I. A., Mandilaras, I. D., Kontogeorgos, D. A., & Founti, M. A. (2018). Two new methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of cold frame lightweight steel-framed walls. *Energy and Buildings*, 170, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.069>
- Attia, S., Eleftheriou, P., Xeni, F., Morlot, R., Ménézo, C., Kostopoulos, V., ... Hidalgo-Betanzos, J. M. (2017). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 155(2017), 439–458. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043>
- Avdelidis, N. P., & Moropoulou, A. (2003). Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35(7), 663–667. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00210-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00210-4)
- Awbi, H. B., & Hatton, A. (1999). Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*, 30, 233–244. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00063-5)
- Aznar, F., Echarri, V., Rizo, C., & Rizo, R. (2018). Modelling the thermal behaviour of a building facade using deep learning. *PLoS ONE*, 13(12), 1–20.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207616>

- Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, *60*, 35–55. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Baker, P. (2011). *U-values and traditional buildings: in situ measurements and their comparisons to calculated values. Historic Scotland Technical paper 10.*
- Baker, P. H., & van Dijk, H. A. L. (2008). PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. *Building and Environment*, *43*(2), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.009>
- Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, *34*(2), 171–183. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00105-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00105-0)
- Ballarini, I., Corgnati, S. P., & Corrado, V. (2014). Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. *Energy Policy*, *68*, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>
- Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., & Delgado, J. M. P. Q. (2016). Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. *Construction and Building Materials*, *110*, 251–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026>
- Barron, A. R. (1993). Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function. *IEEE Transactions on Information Theory*, *39*(3), 930–945.
- Bellia, L., & Minichiello, F. (2003). A simple evaluator of building envelope moisture condensation according to an European Standard. *Building and Environment*, *38*(3), 457–468. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00060-4)
- Besagni, G., & Borgarello, M. (2018). The determinants of residential energy expenditure in Italy. *Energy*, *165*, 369–386.
- Biddulph, P., Gori, V., Elwell, C. A., Scott, C., Rye, C., Lowe, R., & Oreszczyn, T. (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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.004>
- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J. J., & Marín, D. (2019a). 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>
- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J., & Marín, D. (2019b). Comparison of quantitative IRT to estimate U-value using different approximations of ECHTC in multi-leaf walls. *Energy and Buildings*, *184*, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.028>
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Marín, D., & 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>
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Rodríguez-Jiménez, C. E., & 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>
- Bienvenido-Huertas, D., Oliveira, M., Rubio-Bellido, C., & Mar, D. (2019). A Comparative Analysis of the International Regulation of Thermal Properties in Building Envelope. *Sustainability*, *11*, 5574. <https://doi.org/10.3390/su11205574>
- Bienvenido-Huertas, D., Pérez-Fargallo, A., Alvarado-Amador, R., & Rubio-Bellido, C. (2019). Influence of climate on the creation of multilayer perceptrons to analyse the risk of fuel

- poverty. *Energy & Buildings*, 198, 38–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.063>
- Bienvenido-Huertas, D., Quiñones, J. A. F., Moyano, J., & Rodríguez-Jiménez, C. E. (2018). Patents Analysis of Thermal Bridges in Slab Fronts and Their Effect on Energy Demand. *Energies*, 11(9), 2222. <https://doi.org/10.3390/en11092222>
- Bienvenido-Huertas, D., Rodríguez-Álvarez, R., Moyano, J. J., Rico, F., & Marín, D. (2018). Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations. *Energies*, 11(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/en11020360>
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordóñez, J. L., & Moyano, J. (2019). Optimizing the evaluation of thermal transmittance with the thermometric method using multilayer perceptrons. *Energy and Buildings*, 198, 395–411. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.040>
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordóñez, J. L., & Oliveira, M. J. (2020). Automation and optimization of in-situ assessment of wall thermal transmittance using a Random Forest algorithm. *Building and Environment*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106479>
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordóñez, J., & Martínez-Abella, F. (2019). Estimating Adaptive Setpoint Temperatures Using Weather Stations. *Energies*, 12(7), 1197. <https://doi.org/10.3390/en12071197>
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Sánchez-García, D., & Moyano, J. (2019). Internal surface condensation risk in façades of Spanish social dwellings. *Building Research & Information*, 47(8), 1–20. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1612729>
- Birchall, S., Pearson, C., & Brown, R. (2011). *Solid Wall Insulation Field Trial-Baseline Performance of the Property Sample*.
- Björk, F., & Enochsson, T. (2009). Properties of thermal insulation materials during extreme environment changes. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2189–2195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.006>
- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning*, 24(2), 123–140.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C. J., & Olshen, R. A. (2017). *Classification and regression trees*.
- Brounen, D., Kok, N., & Quigley, J. M. (2012). Residential energy use and conservation: Economics and demographics. *European Economic Review*, 56(5), 931–945. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2012.02.007>
- Budaiwi, I., & Abdou, A. (2013). The impact of thermal conductivity change of moist fibrous insulation on energy performance of buildings under hot–humid conditions. *Energy and Buildings*, 60, 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.035>
- Buratti, C., Barelli, L., & Moretti, E. (2012). Application of artificial neural network to predict thermal transmittance of wooden windows. *Applied Energy*, 98, 425–432. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.004>
- Byrne, A., Byrne, G., Davies, A., & Robinson, A. J. (2013). Transient and quasi-steady thermal behaviour of a building envelope due to retrofitted cavity wall and ceiling insulation. *Energy and Buildings*, 61, 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.044>
- Carroll Jr, J. R. (1948). Natural convection in panel heating. *Heating Ventilating*, 45, 70–76.
- Cesaratto, P. G., & 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>

- Cesaratto, P. G., De Carli, M., & Marinetti, S. (2011). Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation. *Energy and Buildings*, 43(7), 1792–1801. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.021>
- Choi, D. S., & Ko, M. J. (2017). Comparison of Various Analysis Methods Based on Heat Flowmeters and Infrared Thermography Measurements for the Evaluation of the In Situ Thermal Transmittance of Opaque Exterior Walls. *Energies*, 10(7), 1–22. <https://doi.org/10.3390/en10071019>
- Chudzik, S. (2017). Applying infrared measurements in a measuring system for determining thermal parameters of thermal insulation materials. *Infrared Physics and Technology*, 81, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.025>
- Churchill, S. W., & 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.
- CIBSE. (1976). *CIBSE Guide C3, Heat Transfer*.
- CIBSE. (2015). *CIBSE Guide A: Environmental Design. Building* (Vol. 30). [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)00059-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00059-2)
- Cole, R. J., & Sturrock, N. S. (1977). The convective heat exchange at the external surface of buildings. *Building and Environment*, 12(4), 207–214. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90021-X](https://doi.org/10.1016/0360-1323(77)90021-X)
- Cornelis, E. (2019). History and prospect of voluntary agreements on industrial energy efficiency in Europe. *Energy Policy*, 132(June), 567–582. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.003>
- Cucumo, M., De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2006). A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance. *Energy and Buildings*, 38(3), 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.005>
- Cucumo, Mario, Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & 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 & Buildings*, 158, 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.034>
- Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2(4), 303–314.
- Dahlgren, R. A., Boettinger, J. L., Huntington, G. L., & Amundson, R. G. (1997). Soil development along an elevational transect in the western Sierra Nevada, California. *Geoderma*, 78(3–4), 207–236. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00034-7)
- 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. <https://doi.org/10.3390/en6083859>
- Davies, M. G. (2004). *Building heat transfer*.
- De Lieto Vollaro, R., Guattari, C., Evangelisti, L., Battista, G., Carnielo, E., & 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>
- Deb, C., Eang, S., & Santamouris, M. (2018). Using artificial neural networks to assess HVAC related energy saving in retrofitted office buildings, 163, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.075>
- Deconinck, A. H., & Roels, S. (2015). A maximum likelihood estimation of the thermal resistance of a cavity wall from on-site measurements. *Energy Procedia*, 78, 3276–3281. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.723>
- Deconinck, A. H., & Roels, S. (2016). Comparison of characterisation methods determining the

- thermal resistance of building components from onsite measurements. *Energy and Buildings*, 130, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.061>
- Defraeye, T., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 512–522. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.07.026>
- Departamento de Infraestructura (Argentina). (2010). *Decreto Reglamentario 1030/10*.
- Desogus, G., Mura, S., & Ricci, R. (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*, 43(10), 2613–2620. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.025>
- Dietterich, T. G. (2000). Experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: bagging, boosting, and randomization. *Machine Learning*, 40(2), 139–157. <https://doi.org/10.1023/A:1007607513941>
- Domínguez-Amarillo, S., Sendra, J. J., & Oteiza, I. (2016). *La envolvente térmica de la vivienda social. El caso de Sevilla, 1939 a 1979*.
- Domínguez-Muñoz, F., Anderson, B., Cejudo-López, J. M., & Carrillo-Andrés, A. (2010). Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. *Energy Build*, 42, 2159–2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.006>
- Dudoit, S., Fridlyand, J., & Speed, T. P. (2002). Comparison of discrimination methods for the classification of tumors using gene expression data. *Journal of the American Statistical Association*, 97(457), 77–87.
- Earle, R. L., & Earle, M. D. (1983). *Unit Operations in Food Processing*.
- Echarri, V., Espinosa, A., & Rizo, C. (2017). Thermal transmission through existing building enclosures: Destructive monitoring in intermediate layers versus non-destructive monitoring with sensors on surfaces. *Sensors*, 17(12), 1–24. <https://doi.org/10.3390/s17122848>
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (2010). *Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación*.
- Elwell, C. A., Robertson, H., Wingfield, J., Biddulph, P., & Gori, V. (2017). The thermal characteristics of roofs: Policy, installation and performance. *Energy Procedia*, 132, 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.664>
- Emenius, G., Egmar, A. C., & Wickman, M. (1998). Mechanical ventilation protects one-storey single-dwelling houses against increased air humidity, domestic mite allergens and indoor pollutants in a cold climatic region. *Clinical and Experimental Allergy*, 28(11), 1389–1396. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2222.1998.00408.x>
- Engineering science data unit. (1979). *Heat transfer by free convection and radiation - simply shaped bodies in air and other fluids*.
- Escorcia, O., García, R., Trebilcock, M., Celis, F., & Bruscatto, U. (2012). Envelope improvements for energy efficiency of homes in the south-central Chile. *Informes de La Construcción*, 64(528), 563–574. <https://doi.org/10.3989/ic.11.143>
- European Commission. (2002). *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings*.
- European Commission. (2011). *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*.
- European Environment Agency. (2018). *Final energy consumption by sector and fuel (2016)*. Obtenido de: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>
- European Union. (2010). *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council*

of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings.

- European Union. (2018). *Directive 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency.*
- Evangelisti, L., Guattari, C., & Asdrubali, F. (2018). Influence of heating systems on thermal transmittance evaluations: Simulations, experimental measurements and data post-processing. *Energy and Buildings*, 168, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.032>
- Evangelisti, L., Guattari, C., Gori, P., & De Lieto Vollaro, R. (2015). In situ thermal transmittance measurements for investigating differences between wall models and actual building performance. *Sustainability*, 7(8), 10388–10398. <https://doi.org/10.3390/su70810388>
- Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., D'Ambrosio Alfano, F. R., & Dell'Isola, M. (2015). U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. *Energy and Buildings*, 104, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>
- Filippini, M., & Pachauri, S. (2004). Elasticities of electricity demand in urban Indian households. *Energy Policy*, 32(3), 429–436. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00314-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00314-2)
- Fishenden, M., & Saunders, O. A. (1950). *Introduction to Heat Transfer.*
- Fletcher, R. (1980). *Practical methods of optimization.*
- Fohanno, S., & Polidori, G. (2006). Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface. *Energy and Buildings*, 38(5), 548–553. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.09.003>
- Fokaides, P. A., & Kalogirou, S. A. (2011). Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88(12), 4358–4365. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.014>
- Fokaides, P. A., Maxoulis, C. N., Panayiotou, G. P., Neophytou, M. K.-A., & Kalogirou, S. A. (2011). Comparison between measured and calculated energy performance for dwellings in a summer dominant environment. *Energy and Buildings*, 43(11), 3099–3105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.005>
- Franzmeier, D. P., Pedersen, E. J., Longwell, T. J., Byrne, J. G., & Losche, C. K. (1969). Properties of Some Soils in the Cumberland Plateau as Related to Slope Aspect and Position1. *Soil Science Society of America Journal*, 33, 755–761. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300050037x>
- Friedman, C., Becker, N., & 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>
- Gaspar, K., Casals, M., & Gangoellis, M. (2016). A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. *Energy and Buildings*, 130, 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.072>
- Gaspar, K., Casals, M., & Gangoellis, M. (2018). Energy & Buildings In situ measurement of façades with a low U-value: Avoiding deviations. *Energy & Buildings*, 170, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.012>
- Genova, E., & Fatta, G. (2018). The thermal performances of historic masonry: In-situ measurements of thermal conductance on calcarenite stone walls in Palermo. *Energy and Buildings*, 168, 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.009>
- Giesecke, F. E. (1940). Radiant heating and cooling. *ASHVE, J, Heating Piping Air Cond*, 12, 484–485.
- Gładyszewska-Fiedoruk, K. (2013). Correlations of air humidity and carbon dioxide

- concentration in the kindergarten. *Energy and Buildings*, 62, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.052>
- Gnip, I., Véljeli, S., & Vaitkus, S. (2012). Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10°C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50°C. *Energy and Buildings*, 52, 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.029>
- 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*.
- Gobierno de España. (2006). *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*.
- Gomes, M. G., Flores-Colen, I., Manga, L. M., Soares, A., & de Brito, J. (2017). The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. *Construction and Building Materials*, 135, 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.166>
- Gori, V., & Elwell, C. A. (2018). Estimation of thermophysical properties from in-situ measurements in all seasons: quantifying and reducing errors using dynamic grey-box methods. *Energy and Buildings*, 167, 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.048>
- Gori, V., Marincioni, V., Biddulph, P., & Elwell, C. A. (2017). Inferring the thermal resistance and effective thermal mass distribution of a wall from in situ measurements to characterise heat transfer at both the interior and exterior surfaces. *Energy & Buildings*, 135, 398–409. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.043>
- Grinzato, E., Bison, P., Cadelano, G., & Peron, F. (2010). R-value estimation by local thermographic analysis. *Thermosense XXXII*, 7661(May 2010), 76610H-76610H – 15. <https://doi.org/10.1117/12.850729>
- Guattari, C., Evangelisti, L., Gori, P., & Asdrubali, F. (2017). Influence of internal heat sources on thermal resistance evaluation through the heat flow meter method. *Energy and Buildings*, 135, 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.045>
- Gutschker, O. (2004). *LORD-modelling and identification software for thermal systems, user manual*.
- Gutschker, O. (2008). Parameter identification with the software package LORD. *Building and Environment*, 43(2), 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.010>
- Hagishima, A., & Tanimoto, J. (2003). Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. *Building and Environment*, 38(7), 873–881. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00033-7)
- Hagishima, A., Tanimoto, J., & Narita, K. (2005). Intercomparisons of Experimental Convective Heat Transfer Coefficients and Mass Transfer Coefficients of Urban Surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, 117(3), 551–576. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-2078-7>
- Hatton, A., & Awbi, H. B. (1995). Convective heat transfer in rooms. En *Building Simulation'95, Fourth Int. Conf., Proceedings*.
- Haykin, S. S., Haykin, S. S., Haykin, S. S., & Haykin, S. S. (2009). *Neural networks and learning machines*.
- Holman, J. P. (1986). *Heat Transfer (6th Edition)*.
- Holme, J., Hägerhed-Engman, L., Mattsson, J., Sundell, J., & Bornehag, C. G. (2010). Culturable mold in indoor air and its association with moisture-related problems and asthma and allergy among Swedish children. *Indoor Air*, 20(4), 329–340. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00658.x>
- Horne, R., & Hayles, C. (2008). Towards global benchmarking for sustainable homes: an international comparison of the energy performance of housing. *Journal of Housing and the*

- Built Environment*, 23(2), 119–130. <https://doi.org/10.1007/s10901-008-9105-1>
- Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5), 359–366. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8)
- Hottinger, M. (1938). Der Wärmeverbrauch bei Deckenheizungen. *Gesundheitsingenieur*, 61, 738.
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (1996). R: A Language for Data Analysis and Graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3), 299–314.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2019). *Balance del consumo energético en el año 2016 (en España)*. Obtenido de: <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/bal.asp?txt=2015&tipbal=t>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1996). *IRAM 11605: Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmisión térmica en cerramientos opacos*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2010). *IRAM 11507-4: Carpintería de obra y fachadas integrales livianas. Ventanas exteriores. Parte 4 - Requisitos complementarios. Aislación térmica*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). *IRAM 11603: Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*.
- Instituto Nacional de Normalización (Chile). (2008). *NCh 1079:2008. Arquitectura y construcción - Zonificación climática habitacional para Chile y recomendaciones para diseño arquitectónico*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- International Energy Agency. (2013). *World Energy Outlook 2013*. Obtenido de: <http://www.worldenergyoutlook.org/weo2013/>
- International Energy Agency (IEA). (2018). *Statistics*. Obtenido de: <https://www.iea.org/statistics/>
- International Organization for Standardization. (1983). *ISO 6781:1983 - Thermal insulation - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method*.
- International Organization for Standardization. (2007a). *ISO 10456:2007 - Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*.
- International Organization for Standardization. (2007b). *ISO 6946:2007 - Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*.
- International Organization for Standardization. (2008). *ISO/IEC Guide 98-3:2008 - Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*.
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 13788:2012 - Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods*.
- 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*.
- Ito, N. (1972). Field experiment study on the convective heat transfer coefficient on exterior

surface of a building. *ASHRAE Transactions*, 78, 184–191.

Jacob, B., Ritz, B., Gehring, U., Koch, A., Bischof, W., Wichmann, H. E., & Heinrich, J. (2002). Indoor exposure to molds and allergic sensitization. *Environmental Health Perspectives*, 110(7), 647–653. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110647>

Jakob, M. (1949). *Heat transfer*.

Jayamaha, S. E. G., Wijesundera, N. E., & Chou, S. K. (1996). Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*, 31(5), 399–407. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(96\)00014-5](https://doi.org/10.1016/0360-1323(96)00014-5)

Jennings, B. H. (1970). *Environmental engineering; analysis and practice*.

Jiménez, M. J., Madsen, H., & Andersen, K. K. (2008). Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB. *Building and Environment*, 43(2), 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.030>

Jiménez, M. J., Porcar, B., & Heras, M. R. (2009). Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value. *Building and Environment*, 44(2), 361–367. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.010>

Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (1998). *Applied Multivariate Statistical Analysis*.

Jr., J. H. W. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>

Juhl, R., Kristensen, N. R., Bacher, P., Kloppenborg, J., & He, M. (2013). *CTSM-R User Guide*.

Junta de Andalucía. (2017). *Catálogo de los servicios ofrecidos por los laboratorios de control de calidad*. Obtenido de: http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/estaticas/sites/consejeria/areas/carreteras/documentos/Calidad/20170102_catalogo_de_servicios_2017.ods

Jürges, W. (1924). *Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand (heat transfer at a plane wall)*. Druck und Verlag von R. Oldenbourg.

Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (2009). *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*.

Khalifa, A.-J. N. (2001a). Natural convective heat transfer coefficient – a review I. Isolated vertical and horizontal surfaces. *Energy Conversion and Management*, 42(4), 491–504. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00042-X)

Khalifa, A.-J. N. (2001b). Natural convective heat transfer coefficient – a review II. Surfaces in two- and three-dimensional enclosures. *Energy Conversion and Management*, 42(4), 505–517. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00043-1)

Khalifa, A. J. N., & 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(10), 2219–2236. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(90\)90122-B](https://doi.org/10.1016/0017-9310(90)90122-B)

Khokhi, M. (2018). The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance. *Energy and Buildings*, 169, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.055>

Kim, S.-H., Kim, J.-H., Jeong, H.-G., & Song, K.-D. (2018). Reliability Field Test of the Air–Surface Temperature Ratio Method for In Situ Measurement of U-Values. *Energies*, 11(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/en11040803>

KIMO INSTRUMENTS. (2010). *Determination of U coefficient*.

Kimura, K. (1977). *Scientific basis of air conditioning*.

King, W. J. (1932). *The basic laws and data of heat transmission*.

- Kisilewicz, T., & Wrobel, A. (2010). Quantitative infrared wall inspection. In *QIRT 2010 - 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- Kohavi, R. (1995). A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 5). <https://doi.org/10.1067/mod.2000.109031>
- Krus, M., Rosler, D., & Sedlbauer, K. (2006). New model for the hygrothermal calculation of condensate on the external building surface. In *Proceedings of third international building physics conference—research in building physics and building engineering, Concordia University, Montreal, Canada* (pp. 27–31).
- Kupke, C. (1976). *Untersuchungen über ein Wärmedämm-Schnellmeßverfahren*.
- Kurekci, N. A. (2016). Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. *Energy and Buildings*, 118(825), 197–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.004>
- Kurtz, F., Monzón, M., & López-Mesa, B. (2015). Energy and acoustics related obsolescence of social housing of Spain's post-war in less favoured urban areas. The case of Zaragoza. *Informes de La Construcción*, 67(Extra-1), m021. <https://doi.org/10.3989/ic.14.062>
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
- Larbi Youcef, M. H. A., Feuillet, V., Ibos, L., Candau, Y., Balcon, P., & Filloux, A. (2012). In situ quantitative diagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography. In *QIRT 2012 - 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- Larivière, B., & Van Den Poel, D. (2005). Predicting customer retention and profitability by using random forests and regression forests techniques. *Expert Systems with Applications*, 29(2), 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.04.043>
- Lehmann, B., Ghazi Wakili, K., Frank, T., Vera Collado, B., & Tanner, C. (2013). Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. *Applied Energy*, 110, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.066>
- Li, F. G. N., Smith, A. Z. P., Biddulph, P., Hamilton, I. G., Lowe, R., Mavrogianni, A., Oreszczyn, T. (2014). Solid-wall U-values: heat flux measurements compared with standard assumptions. *Building Research & Information*, 43(2), 238–252. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.967977>
- Li, L. D., Beckman, W. A., & Mitchell, J. W. (1983). *An experimental study of natural convection in an office room, large time results*.
- Litti, G., Khoshdel, S., Audenaert, A., & Braet, J. (2015). Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings. *Energy and Buildings*, 105, 393–411. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.049>
- Liu, Y., & Harris, D. J. (2015). Measurements of wind speed and convective coefficient on the external surface of a low-rise building. *International Journal of Ambient Energy*, 36(5), 225–234. <https://doi.org/10.1080/01430750.2013.853204>
- Lokmanhekim, M. (1971). *Procedure for determining heating and cooling loads for computerized energy calculations. Algorithms for building heat transfer subroutines*.
- Loveday, D. L., & Taki, A. H. (1996). Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(8), 1729–1742. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00268-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00268-5)
- Lu, S., Li, Q., Bai, L., & Wang, R. (2019). Performance predictions of ground source heat pump system based on random forest and back propagation neural network models. *Energy*

- Conversion and Management*, 197(August), 111864.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111864>
- Lucchi, E. (2017a). Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements. *Energy and Buildings*, 134, 171–184.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.045>
- Lucchi, E. (2017b). Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data. *Energy and Buildings*, 151, 393–405.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.002>
- Lucchi, E. (2018). Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(May 2017), 3077–3090.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>
- Lunde, P. J. (1980). *Solar thermal engineering : space heating and hot water systems*.
- Luxán García de Diego, M. de, Gómez Muñoz, G., & Román López, E. (2015). Towards new energy accounting in residential building. *Informes de La Construcción*, 67, 1–10.
<https://doi.org/10.3989/ic.14.059>
- Madding, R. (2008). Finding R-values of Stud-Frame Constructed Houses with IR Thermography. *Proceedings of InfraMation*.
- Madsen, H., Bacher, P., Bauwens, G., Deconinck, A.-H., Reynders, G., Roels, S., ... Lethé, G. (2015). *Thermal Performance Characterization using Time Series Data ; IEA EBC Annex 58 Guidelines. DTU Compute-Technical Report-2015*. Technical University of Denmark (DTU). (DTU Compute-Technical Report-2015; No. 8).
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1564.4241>
- Magalhães, S. M. C., Leal, V. M. S., & Horta, I. M. (2017). Modelling the relationship between heating energy use and indoor temperatures in residential buildings through Artificial Neural Networks considering occupant behavior. *Energy & Buildings*, 151, 332–343.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.076>
- Maroy, K., Carbonez, K., Steeman, M., & Van Den Bossche, N. (2017). Assessing the thermal performance of insulating glass units with infrared thermography: Potential and limitations. *Energy and Buildings*, 138, 175–192. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.054>
- Mba, L., Meukam, P., & Kemajou, A. (2016). Application of artificial neural network for predicting hourly indoor air temperature and relative humidity in modern building in humid region. *Energy and Buildings*, 121, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.046>
- McAdams, W. H. (1954). *Heat transmission*.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). Cradle to Cradle. *Chemical and Engineering News*, 80(3), 208. <https://doi.org/10.1021/es0326322>
- McIntyre, D. A. (1985). In situ measurement of U-values. *Building Services Engineering Research & Technology*, 6(1), 1–6. <https://doi.org/10.1177/014362448500600101>
- Meng, X., Yan, B., Gao, Y., Wang, J., Zhang, W., & Long, E. (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>
- Min, T. C., Schutrum, L. F., Parmelee, G. V., & Vouris, J. D. (1956). Natural convection and radiation in a panel heated room. *Ashrae Transactions*, 62(1), 337–358.
- Ministério da Economia e do Emprego. (2013). *Decreto-Lei 118/2013*.
- Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. (2006). *Decreto-Lei 80/2006*.
- Ministério do Ambiente. (2015). *Decreto-Lei 251/2015*.

- Mirsadeghi, M., Cóstola, D., Blocken, B., & Hensen, J. L. M. (2013). Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 56(1–2), 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003>
- Mitalas, G., & Stephenson, D. (1967). Room Thermal Response Factors. *ASHRAE Transactions*, 73(III.2), 1–10.
- Mitchell, J. W. (1971). Base Heat Transfer in Two-Dimensional Subsonic Fully Separated Flows. *Journal of Heat Transfer*, 93(4), 342–348. <https://doi.org/10.1115/1.3449829>
- Nardi, I., Paoletti, D., Ambrosini, D., Rubeis, T., & Sfarra, S. (2015). Validation of quantitative IR thermography for estimating the U-value by a hot box apparatus. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 655, pp. 1–10). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012006>
- Nardi, I., Paoletti, D., Ambrosini, D., De Rubeis, T., & Sfarra, S. (2016). U-value assessment by infrared thermography: A comparison of different calculation methods in a Guarded Hot Box. *Energy and Buildings*, 122, 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.017>
- Nardi, I., Sfarra, S., & Ambrosini, D. (2014). Quantitative thermography for the estimation of the U-value: State of the art and a case study. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 547). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/547/1/012016>
- Natephra, W., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2018). Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation. *Building and Environment*, 136, 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.032>
- Naveros, I., Bacher, P., Ruiz, D. P., Jiménez, M. J., & Madsen, H. (2014). Setting up and validating a complex model for a simple homogeneous wall. *Energy & Buildings*, 70, 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.076>
- Naveros, I., Ghiaus, C., Ruíz, D. P., & Castaño, S. (2015). Physical parameters identification of walls using ARX models obtained by deduction. *Energy and Buildings*, 108, 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.021>
- Nicol, K. (1977). The energy balance of an exterior window surface, Inuvik, N.W.T., Canada. *Building and Environment*, 12(4), 215–219. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(77)90022-1)
- Norlén, U. (1990). Estimating thermal parameters of outdoor test cells. *Building and Environment*, 25(1), 17–24. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90036-Q](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90036-Q)
- Norlén, U. (1994). Determining the thermal resistance from in-situ measurements. In *Workshop on Application of System Identification in Energy Savings in Buildings* (pp. 402–429).
- Nusselt, W., & Jürges, W. (1922). Die Kühlung einer ebenen Wand durch einen Luftstrom. *Gesundheits Ingenieur*, 52, 641–642.
- O'Grady, M., Lechowska, A. A., & Harte, A. M. (2017). Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing the heat loss through thermal bridging. *Energy & Buildings*, 135, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.039>
- Obyn, S., & Van Moeseke, G. (2015). Variability and impact of internal surfaces convective heat transfer coefficients in the thermal evaluation of office buildings. *Applied Thermal Engineering*, 87, 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.030>
- Ochs, F., Heidemann, W., & Müller-Steinhagen, H. (2006). Effective thermal conductivity of the insulation of high temperature underground thermal stores during operation. *Ecstock*, 1–7.
- Ochs, F., Heidemann, W., & Müller-Steinhagen, H. (2008). Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(3–4), 539–552.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.005>

- Ohlsson, K. E. A., & Olofsson, T. (2014). Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface. *Applied Energy*, *134*, 499–505. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.058>
- Oral, G. K., & Yilmaz, Z. (2002). The limit U values for building envelope related to building form in temperate and cold climatic zones. *Building and Environment*, *37*(11), 1173–1180. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00102-0)
- Pablo-Romero, M. del P., Pozo-Barajas, R., & Yñiguez, R. (2017). Global changes in residential energy consumption. *Energy Policy*, *101*(April 2016), 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.032>
- Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>
- Palyvos, J. A. (2008). A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied Thermal Engineering*, *28*(8–9), 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005>
- Peeters, L., Beausoleil-Morrison, I., & Novoselac, A. (2011). Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations. *Energy and Buildings*, *43*(9), 2227–2239. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.002>
- Peng, C., & Wu, Z. (2008). In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction. *Energy and Buildings*, *40*(11), 2076–2082. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.012>
- Pérez-Bella, J.M., Domínguez-Hernández, J., Cano-Suñén, E., Del Coz-Díaz, J. J., & Soria, B. R. (2017). Adjusting the design thermal conductivity considered by the Spanish building technical code for façade materials. *Dyna*, *92*(2), 1–11. <https://doi.org/10.6036/8005>
- Pérez-Bella, José M., Domínguez-Hernández, J., Cano-Suñén, E., Alonso-Martínez, M., & Del Coz-Díaz, J. J. (2015). Detailed territorial estimation of design thermal conductivity for façade materials in North-Eastern Spain. *Energy and Buildings*, *102*, 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.025>
- Pérez-Bella, José M., Domínguez-Hernández, J., Cano-Suñén, E., Del Coz-Díaz, J. J., & 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>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, *40*(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Raghu, S., & Siraam, N. (2017). Optimal configuration of multilayer perceptron neural network classifier for recognition of intracranial epileptic seizures. *Expert Systems with Applications*, *89*, 205–221. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.07.029>
- Rasooli, A., Itard, L., & Ferreira, C. I. (2016). A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings. *Energy and Buildings*, *119*, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.009>
- Republique Française. (2010). *Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments.*
- Republique Française. (2017). *Arrêté du 22 mars 2017 modifiant l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants.*

- Republique Française. (2019). *Code de la construction et de l'habitation*.
- Rhee-Duverne, S., & Baker, P. (2013). *Research into the thermal performance of traditional brick walls. English Heritage Research Report*.
- Richardson, I., Thomson, M., & Infield, D. (2008). A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings*, 40(8), 1560–1566. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.006>
- Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., & Clifford, C. (2010). Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings*, 42(10), 1878–1887. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.023>
- Rodrigues, E., Fernandes, M. S., Gaspar, A. R., Gomes, Á., & Costa, J. J. (2019). Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass. *Applied Energy*, 252, 113437.
- Rodríguez-Soria, B., Domínguez-Hernández, J., Pérez-Bella, J. M., & Del Coz-Díaz, J. J. (2014). Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.009>
- Rodríguez-Soria, B., Domínguez-Hernández, J., Pérez-Bella, J. M., & Del Coz-Díaz, J. J. (2015). Quantitative analysis of the divergence in energy losses allowed through building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1000–1008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.002>
- Rossi, M., & Rocco, V. M. (2014). External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity. *Energy and Buildings*, 68(PART C), 732–740. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.049>
- Rotilio, M., Cucchiella, F., De Berardinis, P., & Stornelli, V. (2018). Thermal Transmittance Measurements of the Historical Masonries: Some Case Studies. *Energies*, 11(11), 2987. <https://doi.org/10.3390/en11112987>
- Roulet, C., Gass, J., & Markus, I. (1985). In-Situ U-Value Measurement: Reliable Results in Shorter Time By Dynamic Interpretation of Measured Data. In *Buildings III Conference*.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>
- Rye, C., & Scott, C. (2012). *The SPAB Research Report 1. U-Value Report*.
- Schaak, A. (1965). *Industrial Heat Transfer*.
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- Schweizer, C., Edwards, R. D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W. J., Ilacqua, V., Juhani Jantunen, M., ... Künzli, N. (2007). Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17(2), 170–181. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500490>
- Sfakianaki, A., Pavlou, K., Santamouris, M., Livada, I., Assimakopoulos, M.-N., Mantas, P., & Christakopoulos, A. (2008). Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece. *Building and Environment*, 43(4), 398–405. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2007.01.006>
- Sham, J. F. C., Lo, T. Y., & Memon, S. A. (2012). Verification and application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release characteristics by building fabrics. *Energy and Buildings*, 53, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.018>

- Sharples, S. (1984). Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces. *Building and Environment*, 19(1), 31–39. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(84\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0360-1323(84)90011-8)
- Shin, M. S., Rhee, K. N., Lee, E. T., & Jung, G. J. (2018). Performance evaluation of CO₂-based ventilation control to reduce CO₂ concentration and condensation risk in residential buildings. *Building and Environment*, 142(June), 451–463. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.042>
- Smarra, F., Jain, A., de Rubeis, T., Ambrosini, D., D’Innocenzo, A., & Mangharam, R. (2018). Data-driven model predictive control using random forests for building energy optimization and climate control. *Applied Energy*, 226(September 2017), 1252–1272. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.126>
- Sogin, H. H. (1964). A Summary of Experiments on Local Heat Transfer From the Rear of Bluff Obstacles to a Low Speed Airstream. *Journal of Heat Transfer*, 86(2), 200–202. <https://doi.org/10.1115/1.3687094>
- Sturrock, N. S. (1971). *Localized Boundary-layer Heat Transfer from External Building Surfaces*.
- Sun, W. (2018). River ice breakup timing prediction through stacking multi-type model trees. *Science of the Total Environment*, 644, 1190–1200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.001>
- Taki, A. H., & Loveday, D. L. (1996). External convection coefficients for framed rectangular elements on building facades. *Energy and Buildings*, 24(2), 147–154. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(96\)00972-3](https://doi.org/10.1016/0378-7788(96)00972-3)
- Tanner, C., Lehmann, B., Frank, T., & Wakili, K. G. (2011). Vorschlag zur standardisierten Darstellung von Wärmebildern mit QualiThermo. *Bauphysik*, 33(6), 345–356. <https://doi.org/10.1002/bapi.201110801>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.07.051>
- Tejedor, B., Casals, M., & Gangoells, M. (2018). Assessing the influence of operating conditions and thermophysical properties on the accuracy of in-situ measured U-values using quantitative internal infrared thermography. *Energy & Buildings*, 171, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.011>
- Tejedor, B., Casals, M., Gangoells, M., & 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>
- Test, F. L., Lessmann, R. C., & Johary, A. (1981). Heat Transfer During Wind Flow over Rectangular Bodies in the Natural Environment. *Journal of Heat Transfer*, 103(2), 262–267. <https://doi.org/10.1115/1.3244451>
- TESTO AG. (2014). *U-value measurement*.
- The United Nations Environment Programme. (2012). *Building Design and Construction: Forging Resource Efficiency and Sustainable*.
- Trethowen, H. (1986). Measurement errors with surface-mounted heat flux sensors. *Building and Environment*, 21(1), 41–56. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(86\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(86)90007-7)
- Tsui, C. C., Chen, Z. S., & Hsieh, C. F. (2004). Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. *Geoderma*, 123(1–2), 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.031>
- Tzifa, V., Papadakos, G., Papadopoulou, A. G., Marinakis, V., & Psarras, J. (2017). Uncertainty and method limitations in a short-time measurement of the effective thermal transmittance

- on a building envelope using an infrared camera. *International Journal of Sustainable Energy*, 36(1), 28–46. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.982119>
- United Nations Environment Programme. (2012). Building Design and Construction: Forging Resource Efficiency and Sustainable Development. *Sustainable Buildings and Climate Initiative*.
- Van Dijk, D., Van der Linden, G., Informatics, I. for S. E. and, & Communities, E. S. A. S. C. of the E. (1994). *MRQT user guide; manual for MRQT and the package MRQT/PASTA*. (I. Directorate General XIII for telecommunications & market and exploitation of research, Eds.).
- Vijver, S. Van De, Steeman, M., Bossche, N. Van Den, Carbonez, K., & Janssens, A. (2014). The influence of environmental parameters on the thermographic analysis of the building envelope. In *QIRT 2014 - 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- Vine, E. L., & Kazakevicius, E. (1999). Residential energy use in Lithuania: The prospects for energy efficiency. *Energy*, 24(7), 591–603. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00013-4)
- Waddicor, D. A., Fuentes, E., Sisó, L., Salom, J., Favre, B., Jiménez, C., & Azar, M. (2016). Climate change and building ageing impact on building energy performance and mitigation measures application: A case study in Turin, northern Italy. *Building and Environment*, 102, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.003>
- Walker, R., & Pavia, S. (2015). Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings. *Building and Environment*, 94(P1), 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.033>
- Wang, F., Wang, D., Wang, X., & Yao, J. (2010). A data analysis method for detecting wall thermal resistance considering wind velocity in situ. *Energy and Buildings*, 42(10), 1647–1653. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.007>
- Wang, Y. N. (1994). A neural network adaptive control based on rapid learning method and application. *Advance in Modeling & Analysis*, 46(3), 27–34.
- Wang, Z., Wang, Y., Zeng, R., Srinivasan, R. S., & Ahrentzen, S. (2018). Random Forest based hourly building energy prediction. *Energy and Buildings*, 171, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.008>
- Watanabe, K. (1965). *Architectural Planning Fundamentals*.
- Watmuff, J. H., Charters, W. W. S., & Proctor, D. (1977). Solar and wind induced external coefficients - Solar collectors. *Cooperation Mediterranee Pour l'Energie Solaire, Revue Internationale d'Heliotechnique*, 56.
- Welty, J. R. (1978). *Engineering heat transfer*.
- Werbos, P. (1974). *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavior Science*. Unpublished Doctoral Dissertation, Harvard University. Harvard University.
- Wilkes, G. B., & Peterson, C. M. F. (1938). Radiation and convection from surfaces in various positions. *Transactions, ASHVE*, 44, 513–520.
- Wong, H. Y. (1977). *Heat transfer for engineers*.
- World Meteorological Organization. (2019). *United In Science*.
- WWF. (2014). Living Planet Report 2014: Species and spaces, people and places. *Research Accounting*, 1(1), 180. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Xie, J., Cui, Y., Liu, J., Wang, J., & Zhang, H. (2018). Study on convective heat transfer coefficient on vertical external surface of island-reef building based on naphthalene sublimation method. *Energy and Buildings*, 158, 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.092>

- Xu, M., Watanachaturaporn, P., Varshney, P. K., & Arora, M. K. (2005). Decision tree regression for soft classification of remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 97(3), 322–336. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.008>
- Yazdaniyan, M., & Klems, J. (1993). Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings. *ASHRAE Transactions*, 100, 1–19.
- Yimer, F., Ledin, S., & Abdelkadir, A. (2006). Soil property variations in relation to topographic aspect and vegetation community in the south-eastern highlands of Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 232(1–3), 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.055>
- Zacà, I., D'Agostino, D., Congedo, P. M., & Baglivo, C. (2015). Assessment of cost-optimality and technical solutions in high performance multi-residential buildings in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*, 102, 250–265. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.038>
- Zalewski, L., Lassue, S., Rouse, D., & Boukhalfa, K. (2010). Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2869–2877. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.026>
- Zhou, Y., & Qiu, G. (2018). Random forest for label ranking. *Expert Systems with Applications*, 112, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.036>
- Zurita, A., Castillejo-Cuberos, A., García, M., Mata-Torres, C., Simsek, Y., García, R., ... Escobar, R. A. (2018). State of the art and future prospects for solar PV development in Chile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(April), 701–727. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.096>