



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Desarrollo de un método simplificado de cálculo
para determinar la conductividad térmica de diseño
en materiales de cubierta

Development of a simplified calculation procedure
to determine the design thermal conductivity of
roof materials

Autor

Pablo Sau Escudero

Director

José María Pérez Bella

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2019



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. PABLO SAU ESCUDERO

con nº de DNI 76922826-Q en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
MÁSTER _____, (Título del Trabajo)

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR
LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, a 28 de Enero de 2019

Fdo: PABLO SAU ESCUDERO

RESUMEN

El presente estudio se desarrolla dentro del contexto de la búsqueda de un mayor ahorro energético en los edificios, en este caso mediante la mejora del diseño térmico de su envolvente.

Actualmente, tanto los requisitos como las exigencias básicas en el diseño de la envolvente edificatoria en España vienen recogidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE). Tras su análisis, se constata la carencia de un método o procedimiento que considere la influencia de las condiciones ambientales exteriores de cada emplazamiento, sobre el comportamiento higratérmico de los cerramientos.

Así, las variaciones de las condiciones ambientales externas (temperatura y humedad relativa) modifican la conductividad térmica de los materiales de construcción, provocando un efecto negativo sobre el aislamiento térmico de la envolvente que se opone frontalmente al objetivo de ahorro energético que marca la normativa.

Tomando como referencia el CTE y la norma UNE-EN ISO 10456:2012 (donde se establece un procedimiento para la determinación de los valores de conductividad térmica declarada y de diseño de los materiales), se desarrolla un método funcional que permite resolver esta problemática, corrigiendo mediante una simple multiplicación, los valores de conductividad estandarizados actualmente utilizados para el diseño térmico de los cerramientos.

El método de corrección propuesto se desarrolla, ejecuta y valida centrándose específicamente en los materiales que habitualmente componen las cubiertas de los edificios, utilizando para ello como referencia el Catálogo de Elementos Constructivos del propio CTE. Analizando las condiciones ambientales medias de todas las capitales de provincia españolas, se obtendrán los factores de corrección asociados a cada una de estas ciudades, sentando así las bases para análisis más detallados de regiones españolas.

El análisis técnico realizado muestra una situación en la que los diseños térmicos actuales de las cubiertas consideran, en algunas localizaciones, hasta un 5 % menos de conductividad térmica en los materiales de cubierta, que la realmente existente. La corrección de este error se logra aquí mediante una solución relativamente sencilla, usando un factor corrector que el procedimiento desarrollado calcula y tabula, para cada uno de los emplazamientos estudiados, considerando para ello condiciones ambientales medias.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO	5
3. METODOLOGÍA	6
3.1 Determinación simplificada del factor de corrección de temperatura	7
3.2 Determinación del factor de corrección de humedad.....	12
4. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE DISEÑO.....	18
5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS	21
5.1 Determinación de la resistencia térmica según CTE.....	22
5.2 Determinación de la resistencia térmica según métodos heurístico y analítico desarrollados en el estudio.....	23
5.3 Determinación de la resistencia térmica según ISO 10456:2012	24
5.4 Comparativa de resultados	28
6. HIPÓTESIS DE AJUSTE Y MEJORA DEL MÉTODO.....	30
7. CONCLUSIONES.....	34
8. BIBLIOGRAFÍA	37

1. INTRODUCCIÓN

En este momento, en España, el consumo energético para satisfacer las condiciones de habitabilidad de los edificios, representan alrededor del 20 % del consumo de energía final, un porcentaje que tiende además a incrementarse [1].

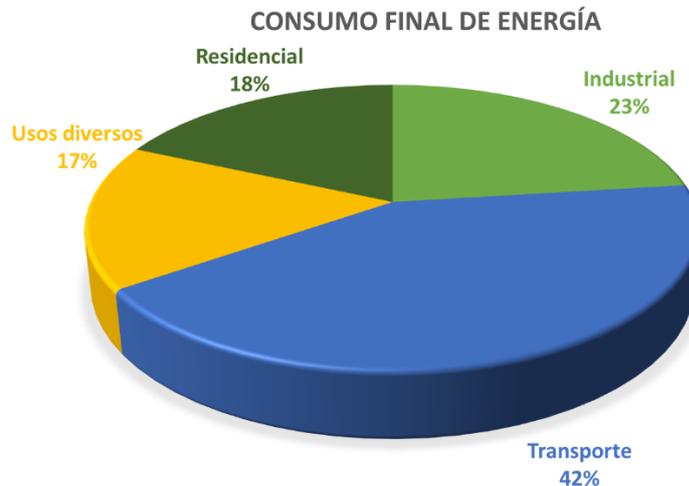


Figura 1.1 Consumo energético final en España (año 2016). Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDAE [1]

Con la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación, se establecen las medidas de eficiencia energética, a respetar con carácter obligatorio, para el proyecto de construcción de un edificio.

La primera exigencia básica se corresponde con el DB-HE-1: Limitación de la demanda energética recoge [2]:

“Los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad (...) para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos.”

El citado documento entra en una aparente contradicción cuando menciona la limitación de la demanda energética en función del clima de la localidad, ya que considera valores constantes de conductividad térmica para los materiales, independientes de las condiciones de operación en las que éstos son colocados [2]:

“Los productos para los cerramientos se definen mediante su conductividad térmica λ (W/m·K) y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua μ . En su caso, además se podrá definir la densidad ρ (kg/m³) y el calor específico c_p (J/kg·K).”

“En todos los casos se utilizarán valores térmicos de diseño, los cuales se pueden calcular a partir de los valores térmicos declarados según la norma UNE EN ISO 10456. En general y salvo justificación, los valores de diseño serán los definidos para una temperatura de 10 °C y un contenido de humedad correspondiente al equilibrio con un ambiente a 23 °C y 50 % de humedad relativa.”

Al asumir con carácter general unas condiciones de diseño fijas (temperatura de 10 °C y contenido de humedad correspondiente al equilibrio a 23 °C y 50 % de humedad relativa), el propio CTE invalida cualquier ajuste en función del clima de cada localidad, al tiempo que proporciona a fabricantes de materiales e ingenieros una referencia estandarizada para los cálculos térmicos del diseño del edificio.

Sin embargo, las condiciones de servicio de los materiales, difieren de las consideradas por el CTE, importadas a su vez de normativas externas elaboradas para países con una climatología diferente. Este hecho, se traduce en un error de cálculo en el dimensionado de los cerramientos que componen la envolvente térmica del edificio, que necesariamente, se traslada al consumo energético de los edificios.

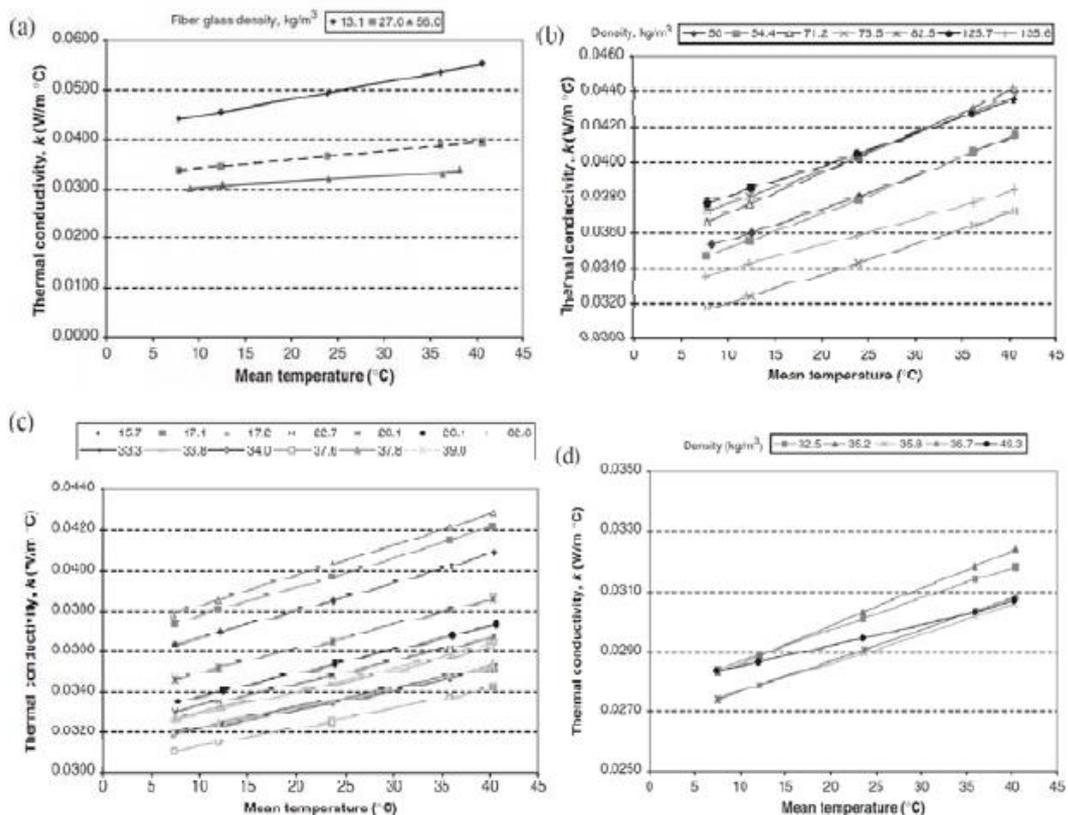


Figura 1.2 Influencia de la densidad y la temperatura de trabajo en la conductividad térmica en materiales aislantes en edificación: Fibra de vidrio (a), Lana de roca (b), EPS (c) y XPS (d). Fuente: Abdou y Budaiwi, 2005 [3].

La variación de la conductividad térmica de los materiales a consecuencia de su temperatura y contenido de humedad puede estimarse adecuadamente mediante la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4], la cual establece un procedimiento para determinar el factor corrector aplicable sobre los valores de conductividad térmica declarados por los fabricantes (en base a una referencia fija como la fijada por el CTE).

No obstante, el procedimiento de la mencionada norma conlleva un cálculo complejo y muy laborioso que, en la aplicación práctica, rara vez suele ser asumido por los proyectistas de edificios.

Por todo lo expuesto, surge la necesidad de desarrollar un método alternativo de cálculo que simplifique el procedimiento recogido en la citada norma al tiempo que permita minimizar el error actualmente cometido al aplicar el CTE.

El método propuesto, ha sido desarrollado previamente, en estudios anteriores para la caracterización de fachadas donde se demostró la infravaloración de las conductividades térmicas de diseño en más de un 4 % [5].

Tomando como referencia la metodología empleada en la caracterización de fachadas, se realizarán las aportaciones y modificaciones necesarias para su aplicabilidad sobre cubiertas.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

Las líneas de acción del trabajo son las siguientes:

- Adaptación y desarrollo de un método de corrección simplificado, específicamente diseñado para la caracterización de cubiertas, reflejando los componentes y propiedades de los materiales habitualmente presentes en ellas.
- Manejo de datos climáticos mensuales de temperatura y humedad relativa facilitados por organismos competentes, para la estimación de las condiciones higrotérmicas externas que se producen en las cubiertas de diferentes emplazamientos españoles.
- Determinación de la corrección necesaria para los valores de conductividad térmica fijados por el Código Técnico de la Edificación de forma general, para cada una de las capitales de provincia españolas.
- Validar las correcciones obtenidas, analizando el diseño térmico de las soluciones constructivas para alguno de los emplazamientos analizados, para tipologías de cubierta concretas y tomando como referencia la norma UNE-EN ISO 10456:2012.
- Generación de mapas que permitan una rápida consulta de los factores correctores, habilitando así un uso más funcional del método propuesto.
- Establecer correlaciones entre variables higrotérmicas y factores correctores, fijando una base sólida para estudios futuros encaminados al refinamiento del método.

3. METODOLOGÍA

La norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4], establece la corrección de los valores térmicos declarados por los fabricantes en unas condiciones ideales de suministro (1) a otras condiciones de servicio reales (2).

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot F_T \cdot F_M \cdot F_a$$

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T \cdot F_M \cdot F_a}$$

Donde:

λ_i Conductividad térmica declarada (1) y real (2).

R_i Resistencia térmica declarada (1) y real (2).

F_T Factor de corrección de temperatura.

F_M Factor de corrección por contenido de humedad.

F_a Factor de corrección por envejecimiento de los materiales. (*)

(*) Para el estudio en cuestión se adoptará un valor de unidad, ya que la propia norma, no establece reglas simples que permitan correlacionar el efecto del envejecimiento a los valores térmicos de diseño. Por otra parte, los valores declarados por los fabricantes ya incorporan el efecto del envejecimiento en sus materiales.

La metodología simplificada que se propone en este trabajo determinará los factores de ajuste F_T y F_M , agrupándolos en un único factor corrector F_C , el cual se proporciona de forma característica para cada emplazamiento a partir de los datos meteorológicos recogidos en el apéndice C del documento de apoyo al DB-HE-2 [2].

$$F_T = e^{f_T (T_2 - T_1)}$$

$$F_M = e^{f_\Psi (\Psi_2 - \Psi_1)}$$

Donde:

f_T Coeficiente de conversión de temperatura, variable según el material y conductividad térmica del mismo, según valores tabulados por la norma para variaciones de 0 a 30 °C (1/K).

f_{ψ} Coeficiente de conversión del contenido de humedad por unidad de volumen, según valores tabulados en la propia norma (m^3/m^3).

Dada la gran variedad de configuraciones, materiales, espesores, etc. que pueden considerarse en la ejecución de cualquier cubierta, así como, las variaciones en las condiciones meteorológicas a lo largo de un año, será necesario establecer un método que, mediante las simplificaciones que se presentarán a continuación, permitan una aproximación válida al valor real de conductividad (y transmitancia térmica) que va a presentar la envolvente.

3.1 Determinación simplificada del factor de corrección de temperatura

Realizar el método descrito en la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4] conlleva el cálculo de la distribución de temperaturas interiores en cada capa de material, para posteriormente determinar el coeficiente corrector de temperatura a aplicar sobre cada una de ellas.

Resulta necesario aligerar el proceso de cálculo mediante la determinación de un único factor F_T , que dependa únicamente del emplazamiento de la cubierta y no de los materiales, espesores y orden empleados en su ejecución.

Para ello se asume, de forma simplificada, que la cubierta se compone de un único material homogéneo, cuyas propiedades genéricas se obtienen al ponderar la influencia de dos grupos de materiales constructivos (albañilería y aislantes).

La problemática se establece en la dificultad de cuantificar esa influencia, debido al gran número de configuraciones de cubierta, y la disparidad de espesores y materiales entre las mismas.

Para abordar esta cuestión se proponen dos métodos alternativos cuya diferencia se traduce en la determinación de la resistencia térmica de los materiales de albañilería:

- Un primer método de carácter heurístico, basado en el estudio de cada una de las capas que integran las catorce tipologías de cubierta recogidas en el capítulo 4 del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [6].

La resistencia térmica en materiales de albañilería se calcula en base a valores razonables de conductividades térmicas y espesores. Dado que el espesor de la capa aislante dependerá en gran medida de la climatología presente en el emplazamiento de la cubierta, se calculan valores de resistencia térmica con distintos espesores de la capa aislante.

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

Posteriormente se obtiene la resistencia térmica del cerramiento como suma de las dos anteriores, y finalmente, se calcula la influencia de los materiales aislantes para cada caso, así como, su influencia promedio.

Materiales de albañilería	e (cm)	λ (W/mK)	R_T (m ² K/W)	R_{total} albañilería (m ² K/W)	R_{total} cerramiento (m ² K/W)				
					e_aislante 4 cm	e_aislante 6 cm	e_aislante 8 cm		
Soporte resistente	30	1,6	0,1875	0,332	1,352	1,852	2,352		
Formación de pendientes	10	1,15	0,087						
Capa de regularización	4	0,85	0,047						
Solado fijo	1	1	0,010						
Materiales aislantes	e (cm)	λ (W/mK)	R_T (m ² K/W)	R_{total} aislantes (m ² K/W)			Influencia aislantes (%)		
				e_aislante 4 cm	e_aislante 6 cm	e_aislante 8 cm	e_aislante 4 cm	e_aislante 6 cm	e_aislante 8 cm
Capa aislante	4	0,04	1	1,020	1,520	2,020	75,48	82,10	85,90
	6	0,04	1,5						
	8	0,04	2						
Impermeabilización	0,15	0,25	0,006						
Capa separadora	0,3	0,22	0,014						
Barrera de vapor	0,03	0,33	0,001						
Influencia aislantes media							81,16 %		

Tabla 3.1 Influencia del aislante en la resistencia térmica del cerramiento de cubierta mediante el método heurístico para una cubierta plana, transitable, no ventilada y solado fijo.

- Por otro lado, un segundo método de carácter analítico toma como referencia los valores de resistencia térmica de diversos materiales de albañilería, proporcionados en las expresiones del capítulo 4 del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [6]. Las resistencias térmicas asociadas a los materiales de albañilería siguen un proceso de cálculo idéntico al método anterior.

Código CEC	R_{total} albañilería (m ² K/W)	R_{total} aislantes (m ² K/W)			R_T (m ² K/W)			Influencia aislantes (%)			Influencia media (%)
		e_aislante 4 cm	e_aislante 6 cm	e_aislante 8 cm	e_aislante 4 cm	e_aislante 6 cm	e_aislante 8 cm	e_aislante 4 cm	e_aislante 6 cm	e_aislante 8 cm	
C 1.1	1,07	1,02	1,52	2,02	2,09	2,59	3,09	48,81	58,69	65,38	57,63
C 1.2	0,55	1,02	1,52	2,02	1,57	2,07	2,57	64,98	73,44	78,60	72,34
C 1.3	0,46	1,02	1,52	2,02	1,48	1,98	2,48	68,93	76,77	81,45	75,72
C 1.4	0,47	1,02	1,52	2,02	1,49	1,99	2,49	68,46	76,39	81,13	75,33
C 1.5	0,42	1,02	1,52	2,02	1,44	1,94	2,44	70,84	78,35	82,79	77,33
C 1.6	0,40	1,02	1,52	2,02	1,42	1,92	2,42	71,84	79,17	83,47	78,16
C 1.7	0,33	1,02	1,52	2,02	1,35	1,85	2,35	75,56	82,17	85,96	81,23
C 1.8	0,35	1,02	1,52	2,02	1,37	1,87	2,37	74,46	81,29	85,23	80,33
Influencia media total										74,76 %	

Tabla 3.2 Influencia del aislante en la resistencia térmica del cerramiento de cubierta mediante el método analítico para una cubierta plana, transitable, no ventilada y solado fijo.

En ambos métodos se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se han considerado espesores de materiales aislantes de 4, 6 y 8 cm. para cubiertas no ventiladas, y 8, 12 y 16 cm. en el caso de que haya cámara de aire ventilada [7].
- En caso de existencia de cámara de aire ventilada, se considera que las condiciones higrotérmicas en las capas exteriores a ella, son las mismas que en el exterior del cerramiento, por lo que, no tendrán aportación al cálculo de la resistencia térmica.
- La aportación a la resistencia térmica de barreras de vapor, impermeabilizaciones y geotextiles actuando como capas separadoras se considera como material aislante. El resto de materiales son englobados en la categoría de albañilería.
- No se han considerado a su vez las resistencias térmicas superficiales y las debidas a materiales de acabado, tales como falsos techos o revestimientos interiores.

Tipología de cubierta	Influencia del aislante en R_T	
	Método heurístico	Método analítico
Plana transitable. No ventilada. Solado fijo.	81,16 %	74,76 %
Plana transitable. No ventilada. Solado flotante.	83,36 %	75,53 %
Plana transitable. Ventilada. Solado fijo.	93,69 %	83,17 %
Plana transitable. Ventilada. Solado flotante.	91,11 %	84,65 %
Plana no transitable. No ventilada. Grava.	79,38 %	77,07 %
Plana no transitable. No ventilada. Autoprotegida.	83,71 %	77,74 %
Plana no transitable. No ventilada. Ajardinada.	65,91 %	58,56 %
Plana no transitable. Ventilada. Autoprotegida.	93,69 %	83,63 %
Inclinada. Forjado inclinado. No ventilada. Capa protección	87,74 %	75,38 %
Inclinada. Forjado inclinado. No ventilada. Autoprotegida.	88,23 %	76,10 %
Inclinada. Forjado inclinado. Ventilada. Capa protección	93,69 %	81,72 %
Inclinada. Forjado horizontal. Ventilada. Capa protección	93,69 %	81,17 %
Inclinada. Ligera. No ventilada.	99,29 %	89,96 %
Inclinada. Entramado de madera. Ventilada	67,03 %	70,06 %

Tabla 3.3 Influencia del aislante en la resistencia térmica del cerramiento de cubierta según métodos heurístico y analítico para las tipologías de cubierta recogidas en el CEC.

De acuerdo con el procedimiento expuesto y, realizando el promedio de cada uno de los valores de influencia obtenidos, se determina que la influencia de los materiales aislantes según los métodos heurístico y analítico corresponde al 86,6 y 78,3 % respectivamente.

3.1.1 Diferencia de temperatura respecto al valor establecido

De la simplificación anterior, se desprende que la diferencia de temperaturas se establece entre la temperatura media del cerramiento homogéneo (T_2) (la cual se tomará como el promedio entre la temperatura exterior media anual y la temperatura interior fijada en 20 °C de acuerdo a las condiciones de diseño establecidas por el CTE), y la temperatura de referencia (T_1) correspondiente a 10 °C tal y como se indica en el apartado 6.1 del DB-HE-1 [2].

$$T_2 = \frac{T_{ext} + 20}{2}$$

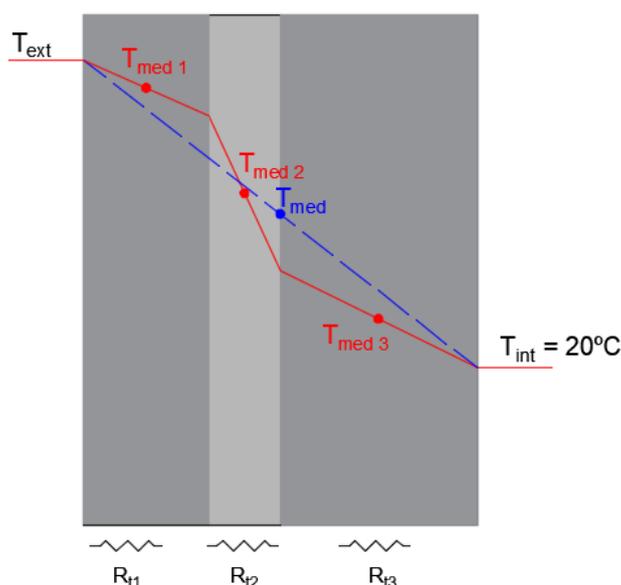


Figura 3.1 Comportamiento térmico real (rojo) vs modelo simplificado (azul).

Realizando el cálculo anteriormente descrito, se constatan diferencias de temperaturas medias anuales respecto al valor establecido por el CTE que oscilan desde los 5 °C en localidades como Ávila y Burgos, hasta valores superiores a 10 °C en Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria.

LOCALIDAD	T_{ext} (°C)	T_{cerr} (°C)	$T_2 - T_1$ (°C)
Barcelona	15,33	17,67	7,67
Madrid	14,31	17,15	7,15

Tabla 3.4 Determinación de la diferencia de temperatura para las localizaciones de Madrid y Barcelona.

3.1.2 Estimación del coeficiente de conversión de temperatura

De acuerdo a la consideración realizada de que nos encontramos ante un cerramiento formado por un único material homogéneo y genérico, el cual pondera los comportamientos de los materiales aislantes y de albañilería habitualmente presentes, se

puede establecer la siguiente expresión para el cálculo del coeficiente de conversión de temperatura:

$$f_{T \text{ global}} = f_{T \text{ aislantes}} \cdot \text{Influencia}_{\text{aislantes}} + f_{T \text{ albañilería}} \cdot \text{Influencia}_{\text{albañilería}}$$

Conociendo la influencia de los materiales por los métodos expuestos anteriormente, únicamente será necesario evaluar los coeficientes f_T asociados de cada grupo de materiales.

Utilizando un valor promedio para cada grupo, se adopta un criterio simple que permita definir ambos coeficientes fácilmente. Atendiendo a los valores tabulados del Anejo A de la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4] se observa que los materiales aislantes presentan coeficientes de temperatura entre 0,0026 y 0,0069 K⁻¹, mientras que los materiales de albañilería presentan valores de 0,001 a 0,003 K⁻¹.

Tabla A.3 – Poliestireno extruido

Tipo de producto	Conductividad λ W/(m·K)	Coefficiente de conversión f_T 1/K
Sin pieles	0,025	0,004 6
	0,030	0,004 5
	0,040	0,004 5
Con pieles, productos de célula fina sin piel	0,025	0,004 0
	0,030	0,003 6
	0,035	0,003 5
Con recubrimiento impermeable	0,025	0,003 0
	0,030	0,002 8
	0,035	0,002 7
	0,040	0,002 6

Tabla A.111 – Hormigón, arcilla cocida y mortero

Tipo de producto	Conductividad λ W/(m·K)	Coefficiente de conversión f_T 1/K
Hormigón aligerado	0,100	0,003
	0,150	0,002
	0,400	0,001
Hormigón denso, arcilla cocida y mortero	todas	0,001

Tabla A.12 – Silicato cálcico

Tipo de producto	Conductividad λ W/(m·K)	Coefficiente de conversión f_T 1/K
Todos los productos	todas	0,003

Figura 3.2 Valores del coeficiente de conversión de temperatura para productos de poliestireno extruido (izq.) y materiales de albañilería (der.). Fuente: UNE-EN ISO 10456:2012 [4].

En base a lo expuesto, los valores que definen el valor del coeficiente corrector f_T para materiales aislantes y de albañilería son 0,00475 y 0,002 K⁻¹ respectivamente, pudiendo obtener el coeficiente global, así como, las expresiones que definen el factor corrector de temperatura.

$$f_{T \text{ global}} = 0,0475 \cdot 0,866 + 0,002 \cdot 0,134 = 0,00438 \text{ (Método heurístico)}$$

$$f_{T \text{ global}} = 0,0475 \cdot 0,783 + 0,002 \cdot 0,217 = 0,00415 \text{ (Método analítico)}$$

Dando como resultado los siguientes factores de conversión por temperatura:

$$F_T = e^{0,00438 (T_2 - 10)} \text{ (Método heurístico)}$$

$$F_T = e^{0,00415 (T_2 - 10)} \text{ (Método analítico)}$$

3.2 Determinación del factor de corrección de humedad

Tal y como se ha desarrollado la corrección por temperatura, se procede a definir el factor corrector de humedad, dependiente de un coeficiente de conversión f_{ψ} , y una diferencia del contenido de humedad.

La estimación de este segundo aspecto, supone un grado de dificultad mayor ya que la cantidad de agua que almacenan distintos materiales, en condiciones de temperatura y humedad similares, sufre una gran dependencia de la naturaleza interna (densidad, estructura porosa...) de los mismos.

Como solución se adoptarán, al igual que en el apartado anterior, las simplificaciones necesarias con objeto de solventar la problemática presentada.

3.2.1 Diferencia de contenido de humedad respecto al valor establecido

Tomando como punto de partida los datos climáticos (temperatura y humedad relativa) mensuales de capitales de provincia y conociendo que las condiciones interiores constantes establecidas por el CTE en 20 °C y 55 % de humedad relativa (clase de higrometría 3 o inferior, correspondiente a espacios en los que no se prevea una alta producción de humedad, como oficinas, tiendas, zonas de almacenamiento y todos los espacios en edificios de uso residencial) [2], se puede obtener, mediante las siguientes expresiones [5], las presiones de saturación y de vapor en el exterior y el interior del cerramiento.

$$P_{SAT} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3+T}}$$

$$P_V = P_{SAT} \cdot HR$$

En el apartado anterior, se ha desarrollado el cálculo de la temperatura media en el cerramiento que permitirá el cálculo de la presión de saturación y, aproximando la presión de vapor, como el promedio de la presión de vapor interior y exterior, es posible determinar un valor para la humedad relativa del cerramiento para cada emplazamiento.

LOCALIDAD	T _{ext} (°C)	T _{cerr} (°C)	H _R (%)	HR _{cerr} (%)
Barcelona	15,33	17,67	71,58	62,67
Madrid	14,31	17,15	56,42	56,37

Tabla 3.5 Determinación de la humedad relativa en el cerramiento para las localizaciones de Madrid y Barcelona.

Aplicando las expresiones anteriores, se constata que el contenido de humedad máximo medio anual corresponde a Ceuta con un 69,75 %, mientras que el valor mínimo se sitúa en Madrid con un 56,37 %.

Como se observa, en ambos casos el contenido de humedad es superior al considerado por el CTE (23 °C y 50 % de HR) [2]. Ambas localizaciones permitirán acotar el rango de interés del estudio, el cual comprenderá humedades relativas comprendidas entre el 55 y el 70 %.

Sin embargo, no es suficiente con determinar la humedad relativa en el aire interior del cerramiento para calcular la cantidad de agua contenida en el interior de los materiales. Para completar la caracterización, es necesario estudiar los fenómenos de adsorción y desorción de los materiales.

La representación gráfica de dicho fenómeno se realiza mediante las curvas isotermas de adsorción y desorción, al registrar experimentalmente, la cantidad de agua adsorbida por el material por unidad de masa o volumen, variando la humedad relativa con condiciones de temperatura constantes. La norma UNE-EN ISO 12571:2000 se encarga de establecer los condicionantes para la realización del ensayo con una temperatura de referencia de 23 °C [8]. La ausencia de curvas para otras temperaturas distintas es una de las limitaciones que el método debe asumir para ser posible su resolución y uno de los problemas a los que también se enfrenta el procedimiento recogido en la norma UNE-EN ISO 10456:2012) [4].

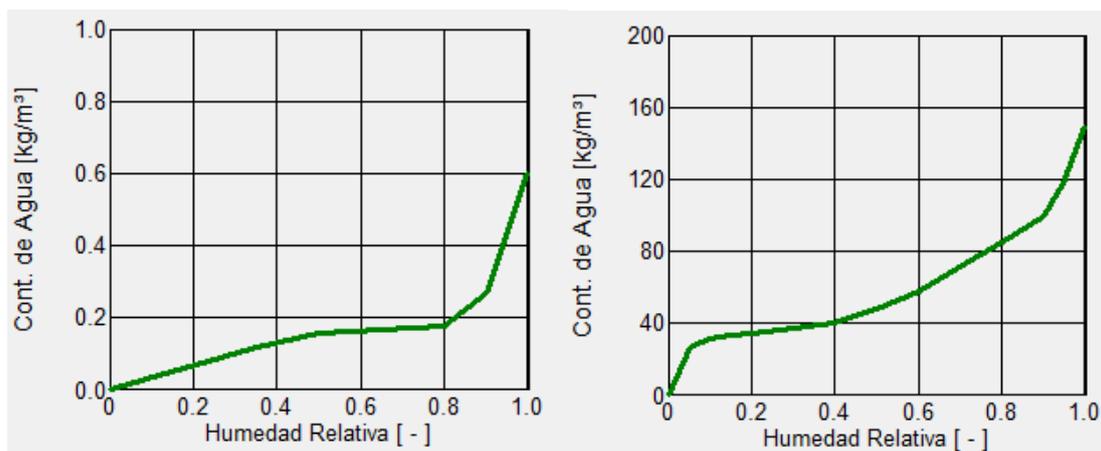


Figura 3.3 Isotermas de sorción de poliestireno expandido (izq.) y hormigón (der.). Fuente: WUFI, 2012b [9].

La caracterización de las curvas de sorción isotermas requiere de un ajuste matemático con objeto de implementarse en herramientas informáticas o bases de datos. En el estudio presente, se utiliza la herramienta de software específico de cálculo higrotérmico WUFI [9], la cual tiene implementada los modelos de ajuste de Künzle (1995) [10] y Krus (1996) [11].

El modelo Künzle se ajusta en base a el contenido de agua para humedades relativas del 80 % (w_{80}), el máximo contenido de agua que el material puede albergar en condiciones de saturación por capilaridad (w_{95}) y el estado seco del material (w_0) [10].

Prestando atención al área de estudio que nos ocupa (55-70 % HR), se advierte que las variaciones del contenido de agua en los materiales, sufren habitualmente, variaciones lo suficientemente pequeñas para poder plantear una aproximación matemática de mayor simplicidad. Así, conociendo gracias a las bases de datos [9], los valores de origen w_0 y el punto de control w_{80} , se plantea una simple una interpolación lineal entre ellos.

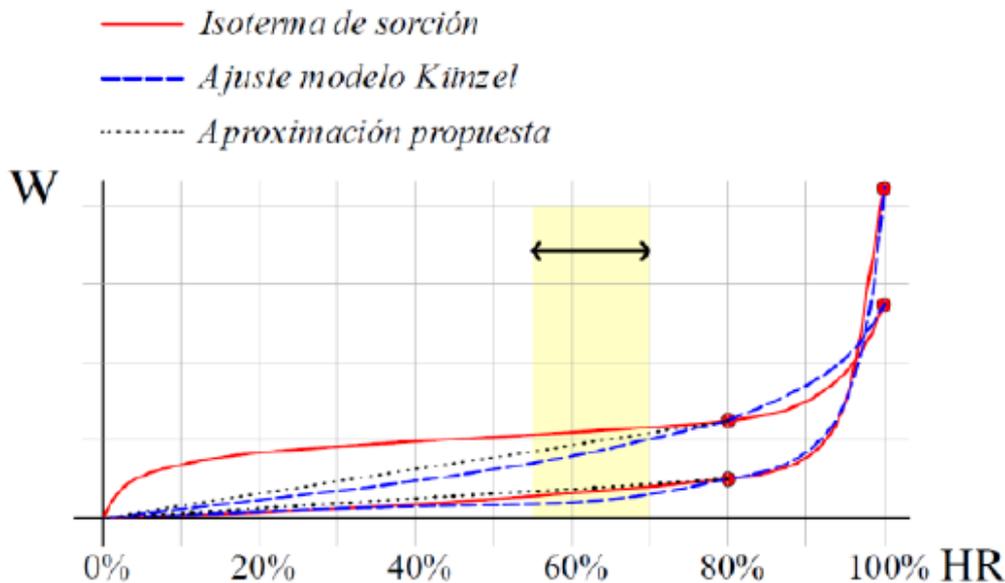


Figura 3.4 Representación del ajuste lineal propuesto para el rango de humedad relativa 55-70 % de interés, a partir del valor w_{80} , aportado por diversas bases de datos. Fuente: Pérez Bella, 2012 [5].

Las bases de datos empleadas (integradas en el software de cálculo higrotérmico WUFI) para la obtención de los valores w_{80} para cada grupo de materiales estudiados son las siguientes [9]:

- Instituto Franhofer-IBP (Alemania).
- LTH Universidad de Lund (Suecia).
- Universidad Tecnológica de Viena (Austria).
- Universidad Noruega de Ciencias y Tecnología.
- Universidad de Dresde (Alemania).

De estas bases de datos se han recopilado diferentes materiales representativos en la ejecución de cubiertas, que permiten obtener un valor w_{80} de referencia para cada una de las familias de materiales presentadas (aislantes y albañilería):

	MATERIAL	W ₈₀ (m ³ /m ³)	W ₈₀ MEDIO (m ³ /m ³)
Aislantes	Lana mineral (Roxul)	0,00070	0,003384
	EPS genérico 20 kg/m ³	0,00018	
	XPS genérico 20 kg/m ³	0,00021	
	Aislamiento de celulosa tratado (Isofloc)	0,00780	
	Espuma de vidrio 120 kg/m ³	0,00630	
	Intello (Barrera de vapor)	0,00670	
	Papel Kraft 120 kg/m ³	0,00180	
Albañilería	Hormigón genérico 2300 kg/m ³ (a/c =0,5)	0,08500	0,044340
	Mortero de fijación	0,04454	
	Hormigón ligero (600 kg/m ³) 72 % porosidad	0,01700	
	Productos de silicato de calcio genérico 1900kg/m ³	0,02500	
	Arcilla expandida (719 kg/m ³)	0,01700	
	Madera de Picea (430kg/m ³)	0,07750	

Tabla 3.6 Determinación aproximada del valor w₈₀ y valor promedio según grupo de materiales, según aproximación Künzel [9]

Basándonos en el mismo criterio de ponderación de la influencia de cada familia de materiales que la aplicada en el caso de la corrección por temperatura, se procede a calcular el valor w_{80 global} para cada método propuesto.

$$w_{80 \text{ global}} = w_{80 \text{ aislantes}} \cdot \text{Influencia}_{\text{aislantes}} + w_{80 \text{ albañilería}} \cdot \text{Influencia}_{\text{albañilería}}$$

$$w_{80 \text{ global}} = 0,03384 \cdot 0,866 + 0,04434 \cdot 0,134 = 0,0089 \frac{m^3}{m^3} \text{ (Método heurístico)}$$

$$w_{80 \text{ global}} = 0,03384 \cdot 0,783 + 0,04434 \cdot 0,217 = 0,0122 \frac{m^3}{m^3} \text{ (Método analítico)}$$

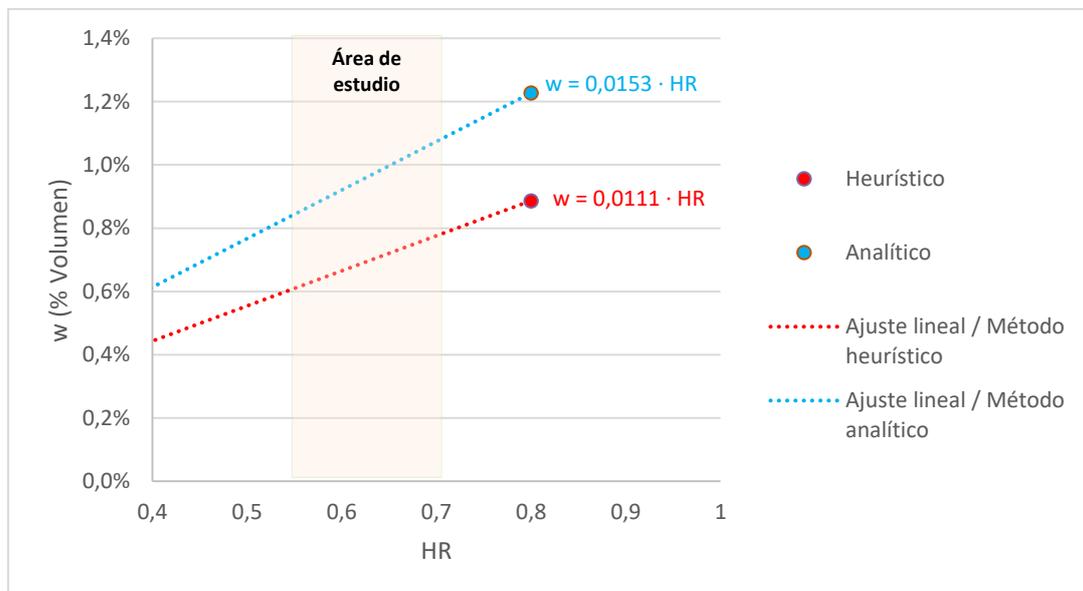


Figura 3.5 Determinación aproximada ponderada del valor w₈₀ (expresado en volumen) y la aproximación lineal para la obtención del contenido de humedad a diferentes humedades relativas en el rango de estudio según los métodos heurístico y analítico.

La aproximación obtenida en unas condiciones de equilibrio a 80 % de humedad relativa y 23 °C permiten la interpolación lineal para otros valores de humedad considerados (capitales de provincia españolas).

$$\psi_2 = w_{\text{emplazamiento}} \approx HR_{\text{cerramiento}} \cdot 0,0111 \text{ (Método heurístico)}$$

$$\psi_2 = w_{\text{emplazamiento}} \approx HR_{\text{cerramiento}} \cdot 0,0153 \text{ (Método analítico)}$$

Para las condiciones de diseño establecidas por el CTE, constantes e iguales para cada emplazamiento, se utilizará el mismo proceso de cálculo.

$$\psi_1 \approx HR_{50\%} \cdot 0,0111 = 0,00555 \frac{m^3}{m^3} \text{ (Método heurístico)}$$

$$\psi_1 \approx HR_{50\%} \cdot 0,0153 = 0,00765 \frac{m^3}{m^3} \text{ (Método analítico)}$$

3.2.2 Estimación al coeficiente de conversión de humedad

Definido el contenido de humedad en los materiales que componen el cerramiento, así como su diferencia respecto a los datos proporcionados por el CTE, se procede, al cálculo del coeficiente de conversión de humedad, el cual, se determina mediante la siguiente expresión:

$$f_{\psi \text{ global}} = f_{\psi \text{ aislantes}} \cdot \text{Influencia}_{\text{aislantes}} + f_{\psi \text{ albañilería}} \cdot \text{Influencia}_{\text{albañilería}}$$

Conocidas las influencias de ambos grupos de materiales, únicamente será necesario establecer un valor promedio de coeficientes para cada familia de materiales.

Atendiendo a los valores tabulados de la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4], se observa que los materiales aislantes tienen valores desde 0,8 hasta 6 m³/m³, por lo que se adopta un valor medio de 3,4 m³/m³. En el caso de los materiales de albañilería, el coeficiente toma valores comprendidos entre 4 y 10 m³/m³, por lo que el coeficiente local se fija en 7 m³/m³.

	MATERIAL	f_{ψ} (m ³ /m ³)
Aislantes	Poliestireno expandido	4
	Espuma rígida de poliuretano	2,5
	Lana mineral	4
Albañilería	Silicato cálcico	10
	Hormigón de árido denso y piedra artificial	4
	Morteros	4

Tabla 3.7 Valores del coeficiente de conversión de humedad para algunos de los materiales tabulados en UNE-EN ISO 10456:2012 [4].

Sustituyendo los valores en la expresión aportada al inicio del apartado se obtienen los valores que caracterizan el coeficiente de conversión por humedad y, las expresiones del factor de corrección por humedad para cada método descrito:

$$f_{\psi \text{ global}} = 3,4 \cdot 0,866 + 7 \cdot 0,134 = 3,88 \text{ (Método heurístico)}$$

$$f_{\psi \text{ global}} = 3,4 \cdot 0,783 + 7 \cdot 0,217 = 4,1813 \text{ (Método analítico)}$$

Dando como resultado los siguientes factores de conversión por humedad:

$$F_M = e^{3,88 (\psi_2 - 0,00555)} \text{ (Método heurístico)}$$

$$F_M = e^{4,1813 (\psi_2 - 0,00765)} \text{ (Método analítico)}$$

4. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE DISEÑO

Agrupando toda la sistemática anterior podemos definir una expresión que mejore los cálculos del diseño térmico de las cubiertas edificatorias.

El factor corrector aplicado depende exclusivamente del emplazamiento (es decir, de las condiciones ambientales externas consideradas) donde se ejecute la edificación.

$$\lambda_{diseño} = \lambda_{declarada} \cdot F_{corrector}$$

Donde:

$$F_C = F_T \cdot F_M = e^{0,00438(T_2-10)} \cdot e^{3,88(\psi_2-0,00555)} \text{ (Método heurístico)}$$

$$F_C = F_T \cdot F_M = e^{0,00415(T_2-10)} \cdot e^{4,181(\psi_2-0,00765)} \text{ (Método analítico)}$$

T_2 Temperatura media anual del cerramiento, supuesta una temperatura interior constante de 20 °C.

$$T_2 = \frac{T_{ext} + 20}{2}$$

ψ_2 Contenido de humedad medio anual del cerramiento (m^3/m^3), aproximada según las simplificaciones presentadas y de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\psi_2 = w_{emplazamiento} \approx HR_{cerramiento} \cdot 0,0111 \text{ (Método heurístico)}$$

$$\psi_2 = w_{emplazamiento} \approx HR_{cerramiento} \cdot 0,0153 \text{ (Método analítico)}$$

Dado que las condiciones más extremas de temperatura y humedad relativa suceden en épocas del año diferentes (julio y agosto vs enero y diciembre), se ha optado por tabular los valores anuales medios para la determinación del factor corrector promedio F_c .

A continuación, se muestran los diagramas de flujo que resumen el proceso llevado a cabo para la obtención de los distintos factores correctores, así como, una tabla resumen con los factores correctores obtenidos por cada método para el diseño de cubiertas en cada capital de provincia española.

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

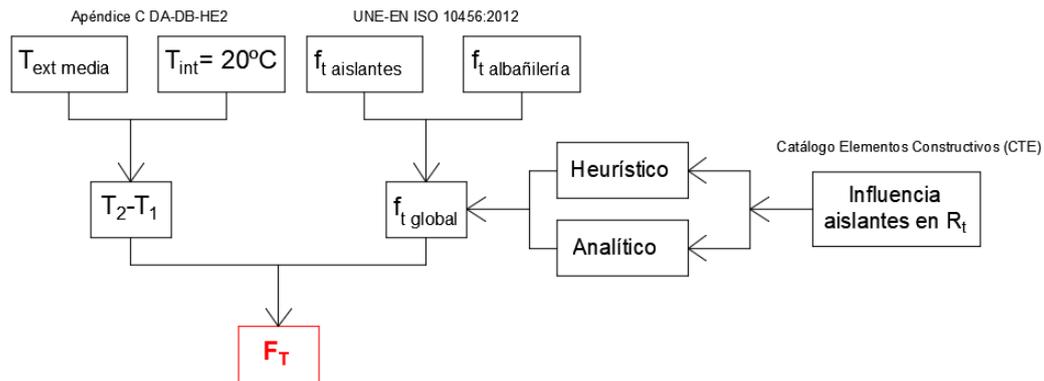


Figura 4.1 Diagrama de flujo para la obtención del factor corrector de temperatura.

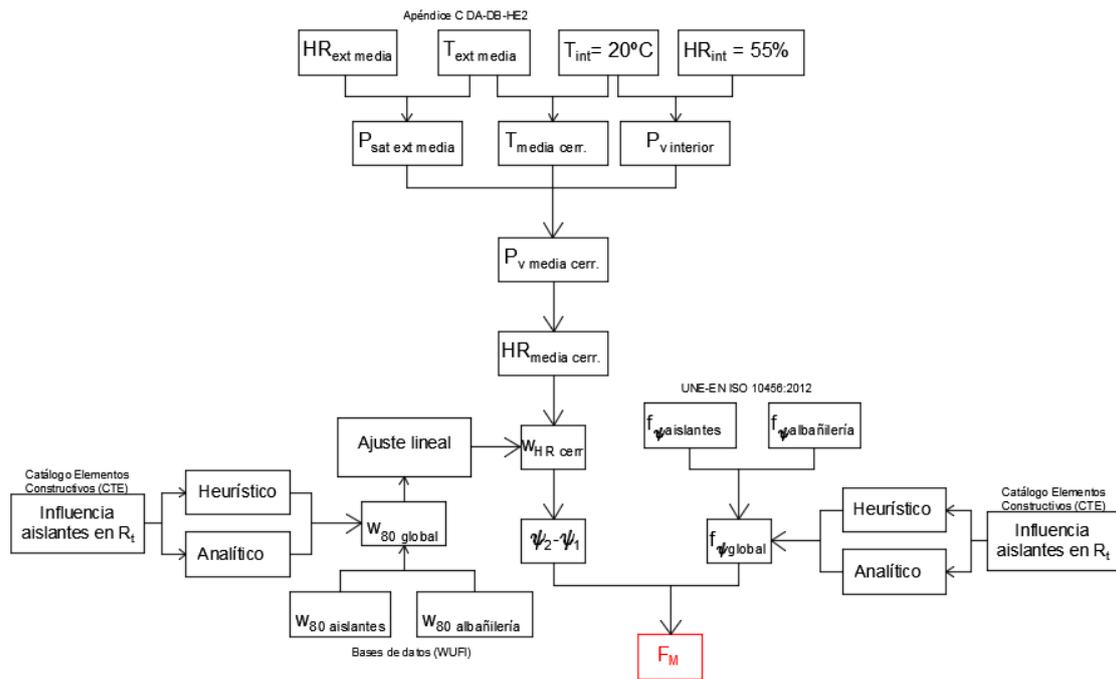


Figura 4.2 Diagrama de flujo para la obtención del factor corrector de humedad.

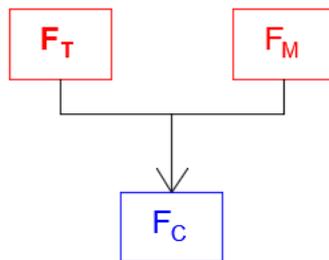


Figura 4.3. Diagrama de flujo para la obtención del factor corrector de diseño.

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

LOCALIDAD	F _T		F _M		F _C		Corrección (%)	
	Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico
Albacete	1,0299	1,0284	1,0039	1,0059	1,0340	1,0344	3,40%	3,44%
Alicante	1,0399	1,0378	1,0045	1,0067	1,0446	1,0448	4,46%	4,48%
Almería	1,0414	1,0392	1,0047	1,0070	1,0462	1,0464	4,62%	4,64%
Ávila	1,0229	1,0217	1,0039	1,0058	1,0269	1,0277	2,69%	2,77%
Badajoz	1,0365	1,0346	1,0044	1,0065	1,0411	1,0414	4,11%	4,14%
Barcelona	1,0342	1,0324	1,0055	1,0082	1,0398	1,0408	3,98%	4,08%
Bilbao	1,0312	1,0296	1,0057	1,0085	1,0371	1,0383	3,71%	3,83%
Burgos	1,0219	1,0207	1,0061	1,0092	1,0281	1,0301	2,81%	3,01%
Cáceres	1,0361	1,0341	1,0032	1,0048	1,0394	1,0391	3,94%	3,91%
Cádiz	1,0408	1,0386	1,0057	1,0086	1,0467	1,0475	4,67%	4,75%
Castellón	1,0373	1,0353	1,0048	1,0072	1,0423	1,0427	4,23%	4,27%
Ceuta	1,0358	1,0339	1,0085	1,0127	1,0446	1,0471	4,46%	4,71%
Ciudad Real	1,0318	1,0302	1,0043	1,0064	1,0362	1,0367	3,62%	3,67%
Córdoba	1,0390	1,0369	1,0041	1,0061	1,0432	1,0432	4,32%	4,32%
A Coruña	1,0314	1,0297	1,0066	1,0098	1,0382	1,0399	3,82%	3,99%
Cuenca	1,0271	1,0257	1,0042	1,0062	1,0314	1,0321	3,14%	3,21%
Girona	1,0314	1,0297	1,0055	1,0082	1,0370	1,0381	3,70%	3,81%
Granada	1,0331	1,0313	1,0034	1,0051	1,0366	1,0366	3,66%	3,66%
Guadalajara	1,0301	1,0285	1,0050	1,0074	1,0352	1,0362	3,52%	3,62%
Huelva	1,0410	1,0388	1,0042	1,0063	1,0453	1,0453	4,53%	4,53%
Huesca	1,0298	1,0282	1,0045	1,0067	1,0344	1,0351	3,44%	3,51%
Jaén	1,0377	1,0357	1,0038	1,0057	1,0417	1,0416	4,17%	4,16%
León	1,0238	1,0226	1,0049	1,0073	1,0289	1,0301	2,89%	3,01%
Lleida	1,0325	1,0308	1,0041	1,0061	1,0367	1,0371	3,67%	3,71%
Logroño	1,0298	1,0283	1,0042	1,0063	1,0342	1,0348	3,42%	3,48%
Lugo	1,0248	1,0235	1,0069	1,0103	1,0319	1,0341	3,19%	3,41%
Madrid	1,0318	1,0302	1,0027	1,0041	1,0347	1,0344	3,47%	3,44%
Málaga	1,0401	1,0380	1,0045	1,0067	1,0448	1,0449	4,48%	4,49%
Melilla	1,0412	1,0390	1,0055	1,0081	1,0469	1,0475	4,69%	4,75%
Murcia	1,0377	1,0357	1,0055	1,0082	1,0434	1,0442	4,34%	4,42%
Ourense	1,0318	1,0301	1,0054	1,0081	1,0374	1,0385	3,74%	3,85%
Oviedo	1,0280	1,0265	1,0066	1,0098	1,0348	1,0366	3,48%	3,66%
Palencia	1,0260	1,0247	1,0055	1,0082	1,0317	1,0331	3,17%	3,31%
Palma de Mallorca	1,0395	1,0374	1,0052	1,0078	1,0450	1,0455	4,50%	4,55%
Palmas, Las	1,0459	1,0434	1,0049	1,0072	1,0510	1,0510	5,10%	5,10%
Pamplona	1,0271	1,0256	1,0050	1,0075	1,0322	1,0333	3,22%	3,33%
Pontevedra	1,0333	1,0316	1,0051	1,0076	1,0386	1,0394	3,86%	3,94%
San Sebastián	1,0289	1,0273	1,0066	1,0099	1,0357	1,0375	3,57%	3,75%
Salamanca	1,0258	1,0244	1,0052	1,0077	1,0311	1,0323	3,11%	3,23%
Santa Cruz de Tenerife	1,0471	1,0446	1,0038	1,0057	1,0511	1,0506	5,11%	5,06%
Santander	1,0316	1,0299	1,0060	1,0089	1,0377	1,0391	3,77%	3,91%
Segovia	1,0261	1,0247	1,0042	1,0063	1,0305	1,0312	3,05%	3,12%
Sevilla	1,0407	1,0385	1,0043	1,0064	1,0452	1,0452	4,52%	4,52%
Soria	1,0231	1,0219	1,0050	1,0074	1,0282	1,0295	2,82%	2,95%
Tarragona	1,0384	1,0363	1,0039	1,0058	1,0424	1,0423	4,24%	4,23%
Teruel	1,0256	1,0242	1,0042	1,0062	1,0298	1,0305	2,98%	3,05%
Toledo	1,0345	1,0327	1,0036	1,0054	1,0383	1,0383	3,83%	3,83%
Valencia	1,0374	1,0354	1,0042	1,0062	1,0417	1,0418	4,17%	4,18%
Valladolid	1,0271	1,0256	1,0041	1,0062	1,0313	1,0320	3,13%	3,20%
Vitoria	1,0247	1,0234	1,0061	1,0092	1,0310	1,0328	3,10%	3,28%
Zamora	1,0278	1,0263	1,0045	1,0068	1,0324	1,0332	3,24%	3,32%
Zaragoza	1,0326	1,0308	1,0039	1,0058	1,0366	1,0368	3,66%	3,68%

Tabla 4.1 Factor local de ajuste sobre los valores de $\lambda_{\text{declarada}}$, según condiciones del CTE.

5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El método debe someterse a un proceso de validación para comprobar la veracidad y la mejora de los resultados que aporta con respecto a los métodos tradicionales (CTE y UNE). Para ello, se escogen tres localizaciones representativas, y tres tipologías constructivas de cubierta alternativas y se someten a cada uno de los métodos de cálculo que se listan a continuación:

- Método estipulado por el Código Técnico de la Edificación (diseño actual) [2].
- Métodos heurístico y analítico desarrollados en el presente trabajo.
- Método definido por la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4] (tomado como referencia por su mayor exhaustividad, laboriosidad y nivel de detalle).

Asumiendo que el método desarrollado en la citada norma es el que aporta mayor rigurosidad pero con un grado mayor de complejidad, el objetivo de este apartado es demostrar la funcionalidad de los métodos desarrollados en el estudio y su mejora de resultados con respecto al método del CTE.

Los datos de partida para llevar a cabo el proceso de validación se exponen en la siguiente tabla:

Localización	Tipología de cubierta	T ^a _{ext} (°C)	HR _{ext} (%)	T ^a _{int} (°C)	HR _{int} (%)
Barcelona	Inclinada – Forjado inclinado – No ventilada	15,33	71,58	20	55
Sevilla	Plana – Transitible – No ventilada – Solado fijo	18,21	65,42	20	55
Madrid	Plana – No transitible – No ventilada – Autoprotegida	14,31	56,42	20	55

Tabla 5.1 Datos constructivos y climáticos de partida para el proceso de validación.

Asimismo se proporcionan los detalles constructivos de las diferentes tipologías de cubiertas analizadas, recogidas en Catálogo de Elementos Constructivos [6], para una mejor comprensión del procedimiento llevado a cabo.

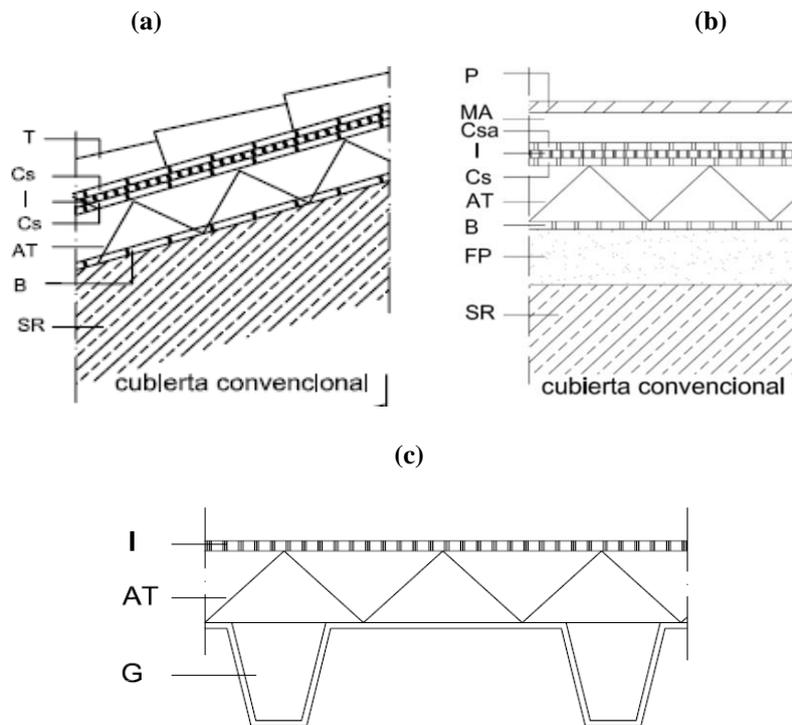


Figura 5.1 Secciones constructivas de las cubiertas analizadas. Inclineda, forjado inclinado, no ventilada (a). Plana, transitable, no ventilada, solado flotante (b). Plana, no transitable, Autoprotegida (c). Fuente: Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [6].

5.1 Determinación de la resistencia térmica según CTE

La expresión que permite el cálculo de la resistencia térmica de diseño según lo establecido en el CTE es la siguiente [2]:

$$R_{T (CTE)} = R_{se} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{si}$$

Donde:

R_{se} Resistencia térmica superficial del cerramiento en contacto con aire exterior. Valor tabulado según DA DB-HE 1 (0,04 m²·K/W para cubiertas).

R_{si} Resistencia térmica superficial del cerramiento en contacto con aire interior. Valor tabulado según DA DB-HE 1 (0,1 m²·K/W para cubiertas).

e_i Espesor de la capa (m).

λ_i Conductividad térmica de diseño del material que compone la capa.

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

Barcelona				
Composición constructiva	e (cm)	λ (W/mK)	R_T (m ² K/W)	R_{TOTAL} (m ² K/W)
Aire exterior			0,040	2,924
Teja cerámica	1	1	0,010	
Impermeabilización	0,15	0,25	0,006	
Aislamiento poliestireno extruido	8	0,031	2,581	
Forjado unidireccional hormigón	30	1,6	0,188	
Aire interior			0,100	
Sevilla				
Composición constructiva	e (cm)	λ (W/mK)	R_T (m ² K/W)	R_{TOTAL} (m ² K/W)
Aire exterior			0,040	1,811
Solería cerámica	1	1	0,010	
Mortero de regularización (M-5)	4	0,85	0,047	
Impermeabilización	0,15	0,25	0,006	
Aislamiento de poliestireno expandido	4	0,03	1,333	
Hormigón ligero formación de pendientes	10	1,15	0,087	
Forjado reticular de hormigón	30	1,6	0,188	
Aire interior			0,100	
Madrid				
Composición constructiva	e (cm)	λ (W/mK)	R_T (m ² K/W)	R_{TOTAL} (m ² K/W)
Aire exterior			0,040	2,730
Impermeabilización	0,15	0,25	0,006	
Aislamiento de lana mineral	8	0,031	2,581	
Barrera de vapor	0,15	0,42	0,004	
Aire interior			0,100	

Tabla 5.2 Resistencias térmicas de diferentes localizaciones y cubiertas según el método del CTE

5.2 Determinación de la resistencia térmica según métodos heurístico y analítico desarrollados en el estudio

Realizando el método desarrollado en el estudio, se aplica el factor corrector para el cálculo de las conductividades térmicas de diseño.

$$R_{T (Heurístico-Analítico)} = R_{se} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot F_c} + R_{si}$$

Donde:

R_{se} Resistencia térmica superficial del cerramiento en contacto con aire exterior. Valor tabulado según DA DB-HE 1 (0,04 m²-K/W para cubiertas).

R_{si} Resistencia térmica superficial del cerramiento en contacto con aire interior. Valor tabulado según DA DB-HE 1 (0,1 m²-K/W para cubiertas).

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

- e_i Espesor de la capa (m).
- λ_i Conductividad térmica de diseño del material que compone la capa.
- F_c Factor corrector de la conductividad de diseño, dependiente del emplazamiento y del método (heurístico/analítico) aplicado.

Barcelona		F_c heurístico				1,0398	
		F_c analítico				1,0408	
Composición constructiva	e (cm)	$\lambda_{Corregida}$ (W/mK)		R_T (m ² K/W)		R_{TOTAL} (m ² K/W)	
		Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico
Aire exterior				0,040	0,040	2,818	2,815
Teja cerámica	1	1,04	1,04	0,010	0,010		
Impermeabilización	0,15	0,26	0,26	0,006	0,006		
Aislamiento poliestireno extruido	8	0,03	0,03	2,482	2,480		
Forjado unidireccional hormigón	30	1,66	1,67	0,180	0,180		
Aire interior				0,100	0,100		
Sevilla		F_c heurístico				1,0452	
		F_c analítico				1,0452	
Composición constructiva	e (cm)	$\lambda_{Corregida}$ (W/mK)		R_T (m ² K/W)		R_{TOTAL} (m ² K/W)	
		Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico
Aire exterior				0,040	0,040	1,739	1,739
Solería cerámica	1	1,05	1,05	0,010	0,010		
Mortero de regularización (M-5)	4	0,89	0,89	0,045	0,045		
Impermeabilización	0,15	0,26	0,26	0,006	0,006		
Aislamiento de poliestireno expandido	4	0,03	0,03	1,276	1,276		
Hormigón ligero formación de pendientes	10	1,20	1,20	0,083	0,083		
Forjado reticular de hormigón	30	1,67	1,67	0,179	0,179		
Aire interior				0,100	0,100		
Madrid		F_c heurístico				1,0347	
		F_c analítico				1,0344	
Composición constructiva	e (cm)	$\lambda_{Corregida}$ (W/mK)		R_T (m ² K/W)		R_{TOTAL} (m ² K/W)	
		Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico	Heurístico	Analítico
Aire exterior				0,040	0,040	2,643	2,644
Impermeabilización	0,15	0,26	0,26	0,006	0,006		
Aislamiento de lana mineral	8	0,03	0,03	2,494	2,495		
Barrera de vapor	0,15	0,43	0,43	0,003	0,003		
Aire interior				0,100	0,100		

Tabla 5.3 Resistencias térmicas de diferentes localizaciones y cubiertas según los métodos heurístico y analítico desarrollados en el presente trabajo.

5.3 Determinación de la resistencia térmica según ISO 10456:2012

Finalmente, se desarrolla el método concebido por la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4], cuyo resultado servirá de referencia para evaluar los obtenidos en los apartados anteriores.

En primer lugar, se deberá evaluar la distribución de temperaturas en cada una de las capas que integran la cubierta, tomando como datos iniciales, las temperaturas exteriores e interiores (temperatura media anual y 20 °C respectivamente), así como, la resistencias térmicas de cada elemento y la total, calculadas según el método expuesto en el CTE [2].

$$T_{se} = T_e + \frac{R_{se}}{R_t} \cdot (T_i - T_e)$$

Donde:

T_{se}	Temperatura en la intercara de estudio.
T_e	Temperatura en la intercara inmediatamente más cercana al exterior.
T_i	Temperatura en el interior de la edificación.
R_{se}	Resistencia térmica del componente situado entre en la intercara de estudio, calculada según CTE.
R_t	Resistencia térmica total del cerramiento, calculada según CTE.

La temperatura de un determinado material componente del cerramiento se calcula como la temperatura media de las intercara entre las que se sitúa. Esta temperatura, permitirá el cálculo de la presión de saturación mediante la expresión expuesta en el apartado 3.3.1 del presente estudio.

$$P_{SAT} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3+T}}$$

Para conocer como es la distribución de las humedades relativas en el interior de cada material debe definirse, en primer lugar, el espesor del aire equivalente de cada capa frente a la difusión de vapor S_i .

$$S_i = e_i \cdot \mu_i$$

Donde:

e_i	Espesor de la capa.
μ_e	Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua de la capa, obtenido a partir de valores tabulados según la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4] u otros documentos reconocidos [9].

Los valores del factor de resistencia a la difusión de vapor de agua se extraen de las bases de datos contenidas en WUFI o en su defecto de la citada norma.

Una vez determinado este parámetro, se pueden calcular las presiones de vapor en cada punto mediante un proceso similar al desarrollado para las temperaturas.

$$P_{se} = P_e + \frac{S_{se}}{S_t} \cdot (P_i - P_e)$$

Donde:

P_{se}	Presión de vapor en la intercara de estudio.
P_e	Presión de vapor en la intercara inmediatamente más cercana al exterior.
P_i	Presión de vapor en el interior de la edificación.
S_{se}	Espesor del aire equivalente de la capa de estudio frente a la difusión del vapor de agua.
S_t	Espesor del aire equivalente del conjunto de las capas que conforman el cerramiento frente a la difusión del vapor de agua.

Al igual que en el caso de las temperaturas, la presión de vapor en cada componente del cerramiento se aproxima como el valor medio de las intercaras entre las que se sitúa.

Conocidas las presiones de vapor y de saturación, el cálculo de la humedad relativa en cada material de la cubierta es inmediato mediante la expresión expuesta en el apartado 3.3.1 del presente estudio.

$$HR = \frac{P_V}{P_{SAT}}$$

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

Barcelona									
Composición constructiva	e (cm)	λ (W/mK)	Rt (m²K/W)	μ	Sd	T_{se} (°C)	Psat (Pa)	Pse (Pa)	HR (%)
Aire exterior			0,040						
Teja cerámica	1	1	0,010	28	0,28	15,41	1246,53	1749,37	71,26%
Impermeabilización	0,15	0,25	0,006	100000	150	15,42	1260,14	1750,81	71,97%
Aislamiento poliestireno extruido	8	0,031	2,581	125	10	17,48	1274,63	1996,59	63,84%
Forjado unidireccional hormigón	30	1,6	0,188	180	54	19,69	1280,43	2292,60	55,85%
Aire interior			0,100						
Sevilla									
Composición constructiva	e (cm)	λ (W/mK)	Rt (m²K/W)	μ	Sd	T_{se} (°C)	Psat (Pa)	Pse (Pa)	HR (%)
Aire exterior			0,040						
Solería cerámica 14x28	1	1	0,010	28	0,28	18,25	1367,16	2095,85	65,23%
Mortero de regularización (M-5)	4	0,85	0,047	16,12	0,64	18,28	1366,97	2099,57	65,11%
Impermeabilización	0,15	0,25	0,006	100000	150	18,31	1337,12	2103,03	63,58%
Aislamiento poliestireno expandido	4	0,03	1,333	21,7	0,87	18,97	1307,22	2192,03	59,63%
Hormigón ligero formación de pendientes	10	1,15	0,087	8	0,80	19,67	1306,89	2290,00	57,07%
Forjado reticular hormigón	30	1,6	0,188	180	54	19,81	1296,03	2309,36	56,12%
Aire interior			0,100						
Madrid									
Composición constructiva	e (cm)	λ (W/mK)	Rt (m²K/W)	μ	Sd	T_{se} (°C)	Psat (Pa)	Pse (Pa)	HR (%)
Aire exterior			0,040						
Impermeabilización	0,15	0,25	0,006	100000	150	14,40	1097,02	1639,46	66,91%
Aislamiento lana mineral	8	0,031	2,581	1,1	0,09	17,09	1274,57	1948,23	65,42%
Barrera de vapor	0,15	0,42	0,004	3000	4,50	19,79	1280,00	2306,43	55,50%
Aire interior			0,100						

Tabla 5.4 Estudio higrotérmico de cada capa de material componente de los cerramientos de cubierta estudiados según norma ISO [4].

Como ya se comentó anteriormente, la norma UNE-EN ISO 10456:2012 suministra coeficientes de conversión de temperatura y humedad, en función del material de estudio [4].

La diferencia de temperatura se establece entre la temperatura media de la capa de estudio, y el valor de referencia del CTE (10 °C).

Apoyándonos en las curvas de sorción suministradas por WUFI [9], y con la distribución de humedades relativas en cada capa como dato de entrada, se determina la cantidad de agua almacenada en el material (ψ_2). Del mismo modo, es necesario conocer la cantidad de agua almacenada en condiciones de HR del 50 %, para el posterior cálculo del factor de corrección.

Asumiendo las simplificaciones desarrolladas en el capítulo 3 del trabajo, las expresiones que permiten el cálculo de la resistencia térmica de diseño son las siguientes:

DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO EN MATERIALES DE CUBIERTA

$$F_{ISO} = F_T \cdot F_M = e^{f_t (T_2 - T_1)} \cdot e^{f_\psi (\psi_2 - \psi_1)}$$

$$R_{T(ISO)} = R_{se} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot F_{ISO}} + R_{si}$$

Barcelona										
Composición constructiva	f_T	$T_2 - T_1$	F_T	f_ψ	$\psi_2 - \psi_1$	F_M	F_{ISO}	$\lambda_{correctada}$ (W/mK)	Rt (m ² K/W)	R _{TOTAL} (m ² K/W)
Aire exterior									0,040	2,828
Teja cerámica	0,0010	5,41	1,0054	10	0,003919	1,0400	1,0456	1,046	0,010	
Impermeabilización ^(*)	0,0040	5,42	1,0219	0	0,000015	1,0000	1,0219	0,255	0,006	
Aislamiento poliestireno extruido	0,0045	7,48	1,0342	2,5	0,000021	1,0001	1,0343	0,032	2,495	
Forjado unidireccional hormigón	0,0030	9,69	1,0295	4	0,005851	1,0237	1,0539	1,686	0,178	
Aire interior									0,100	
Sevilla										
Composición constructiva	f_T	$T_2 - T_1$	F_T	f_ψ	$\psi_2 - \psi_1$	F_M	F_{ISO}	$\lambda_{correctada}$ (W/mK)	Rt (m ² K/W)	R _{TOTAL} (m ² K/W)
Aire exterior									0,040	1,755
Solería cerámica 14x28	0,0010	8,25	1,0083	10	0,001108	1,0111	1,0195	1,020	0,010	
Mortero de regularización (M-5)	0,0020	8,28	1,0167	4	0,006783	1,0275	1,0447	0,888	0,045	
Impermeabilización ^(*)	0,0040	8,31	1,0338	0	0,000009	1,0000	1,0338	0,258	0,006	
Aislamiento poliestireno expandido	0,0036	8,97	1,0328	4	0,000006	1,0000	1,0328	0,031	1,291	
Hormigón ligero formación de pendientes	0,0010	9,67	1,0097	4	0,001178	1,0047	1,0145	1,167	0,086	
Forjado reticular hormigón	0,0030	9,81	1,0299	4	0,006120	1,0554	1,0554	1,689	0,178	
Aire interior									0,100	
Madrid										
Composición constructiva	f_T	$T_2 - T_1$	F_T	f_ψ	$\psi_2 - \psi_1$	F_M	F_{ISO}	$\lambda_{correctada}$ (W/mK)	Rt (m ² K/W)	R _{TOTAL} (m ² K/W)
Aire exterior									0,040	2,666
Impermeabilización ^(*)	0,0040	4,40	1,0177	0	0,000011	1,0000	1,0177	0,254	0,006	
Aislamiento lana mineral	0,0035	7,09	1,0251	4	0,000026	1,0001	1,0252	0,032	2,517	
Barrera de vapor	0,0040	9,79	1,0399	5	0,000220	1,0011	1,0411	0,437	0,003	
Aire interior									0,100	

^(*) Los materiales impermeabilizantes dada sus características no pueden absorber humedad y, por lo tanto su f_ψ es nulo.

Tabla 5.5 Resistencias térmicas de diferentes localizaciones y cubiertas según el método desarrollado en la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4].

5.4 Comparativa de resultados

Tal y como se muestra en la siguiente tabla, se constata que el error producido por cualquiera de los dos métodos desarrollados suponen una notable mejora en la determinación de la conductividad térmica de diseño en materiales de cubierta con respecto al método tradicional desarrollado por el CTE.

El uso de un simple factor corrector (una mera multiplicación de los valores de conductividad actualmente empleados) permite reducir el error en alrededor de un 65 % en algunas localizaciones, pudiendo llegar hasta el 90 % aproximadamente dependiendo de la tipología de cubierta y el emplazamiento de la misma.

Localización	Resistencia Térmica (m ² ·K/W)			Error respecto ISO			
	CTE	Método desarrollado		ISO	CTE	Método desarrollado	
		Heurístico	Analítico			Heurístico	Analítico
Barcelona	2,924	2,818	2,815	2,828	3,38%	0,39%	0,47%
Sevilla	1,811	1,739	1,739	1,755	3,18%	0,93%	0,93%
Madrid	2,730	2,643	2,644	2,666	2,39%	0,86%	0,84%

Tabla 5.6 Resistencias térmicas para cubiertas y localizaciones seleccionadas y error relativo respecto al cálculo desarrollado en UNE-EN ISO 10456:2012.

Pese a que los resultados del proceso de validación muestran un mejor ajuste con el uso del método heurístico sobre el analítico, la diferencia media existente es mínima (0,06%) y el comportamiento observado no es regular (en Madrid, el proceso analítico presenta un mejor ajuste).

Un proceso más exhaustivo de validación (analizando más tipologías de cubiertas y más emplazamientos) permitirían realizar una valoración entre ambos métodos con un nivel de confianza mayor.

Asimismo, cabe mencionar que el uso de métodos estadísticos más exhaustivos en la determinación de la influencia de los materiales en la resistencia térmica, así como, estudios experimentales para la obtención de curvas de sorción para distintas temperaturas a la analizada (23 °C), podrían facilitar el ajuste del método y una mejora en los resultados.

6. HIPÓTESIS DE AJUSTE Y MEJORA DEL MÉTODO

El objeto de este apartado es proponer un ajuste del método desarrollado, el cual permita el cálculo de un factor corrector más ajustado, utilizando para ello como punto de partida la transmitancia térmica orientativa establecida para cada zona climática del país.

En el apéndice E del DB-HE 1 se proporcionan valores característicos de la transmitancia térmica límite en función de la zona climática del emplazamiento de la edificación [2]. El uso de soluciones constructivas con parámetros característicos iguales a los indicados no garantiza el cumplimiento de la exigencia pero debería conducir a soluciones próximas a su cumplimiento. Los valores se han obtenido considerando unos puentes térmicos equivalentes a los del edificio de referencia y un edificio de una compacidad media.

Transmitancia del elemento [W/m ² K]	Zona Climática					
	α	A	B	C	D	E
U _M	0.94	0.50	0.38	0.29	0.27	0.25
U _S	0.53	0.53	0.46	0.36	0.34	0.31
U _C	0.50	0.47	0.33	0.23	0.22	0.19

U_M: Transmitancia térmica de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno

U_S: Transmitancia térmica de suelos (forjados en contacto con el aire exterior)

U_C: Transmitancia térmica de cubiertas

Figura 6.1 Valores de transmitancia térmica límite en función de la zona climática del cerramiento

Fuente: Código Técnico de la Edificación DB-HE-1 [2].

Analizando las configuraciones de cubierta existentes en el Catálogo de Elementos Constructivos, es posible extraer los valores de resistencia térmica de la familia de materiales de albañilería presentes en las mismas.

Determinados los valores de resistencia térmica de albañilería para cada solución constructiva por el CEC [6], podemos extraer el valor de resistencia térmica que han de proporcionar los materiales aislantes para alcanzar los valores característicos establecidos en la normativa para cada zona climática. Llamaremos R_{Contribution} a la contribución térmica de los materiales aislantes en el conjunto de la solución constructiva.

$$\text{Influencia}_{\text{aislantes}}(\%) = \frac{R_{\text{Contribution}}}{R_{\text{Contribution}} + R_{\text{albañilería}}}$$

$$R_{\text{Contribution}} = \frac{1}{U_C} - R_{\text{albañilería}}$$

Donde:

- U_C Transmitancia térmica característica exigida a la cubierta según valores tabulados en el apéndice E del DB-HE 1 [2].
- $R_{\text{albañilería}}$ Resistencia térmica de los materiales de albañilería tabulados según la configuración constructiva de la cubierta en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [6].

Localización	Barcelona	Sevilla	Madrid
Zona climática	C2	B4	D3
U (W/m ² ·K)	0,23	0,33	0,22
Código CEC	C 9.1	C 1.4	C 6.9
R _{albañilería} (m ² ·K/W)	0,99	0,47	0,15
R _{Contribution} (m ² ·K/W)	3,36	2,56	4,40
Influencia aislante (%)	77,23%	84,49%	96,70%

Tabla 6.1 Determinación del valor $R_{\text{Contribution}}$ y porcentaje de influencia de materiales aislantes en las cubiertas sometidas al proceso de validación, a partir del valor de transmitancia térmica límite.

El uso de valores de influencia de los materiales aislantes, caracterizados para cada zona climática y tipología de cubierta concreta, supone a priori, una mejor aproximación al cálculo del factor corrector F_c , frente al uso de un valor promedio como se ha hecho en cualquiera de los dos métodos desarrollados.

En relación a ello, se observan casos significativos como el proceso de validación ejecutado en la cubierta emplazada en Madrid, donde anteriormente se aplicaron porcentajes de influencia de los materiales aislantes del 86,8 y 78,3 % (métodos heurístico y analítico respectivamente), frente al 96,7 % obtenido a partir de su $R_{\text{Contribution}}$.

Obtenida la contribución térmica de los materiales aislantes, el proceso seguido para el cálculo de los diferentes factores correctores es similar al expuesto en el capítulo 3 del presente estudio.

Localización	Barcelona	Sevilla	Madrid
$f_{T \text{ global}}$	0,0041	0,0043	0,0047
T_2-T_1	7,67	9,1	7,15
F_T	1,0321	1,0401	1,0339
$f_{\psi \text{ global}}$	4,2197	3,9584	3,5188
$\psi_2-\psi_1$	0,0014	0,0009	0,0003
F_M	1,0060	1,0035	1,0010
F_C	1,0384	1,0437	1,0349

Tabla 6.2 Determinación del factor corrector F_c a partir de la $R_{\text{Contribution}}$.

Sometiendo a estos nuevos factores correctores a un proceso de verificación utilizando las expresiones desarrolladas en el apartado 5.2, se obtienen las resistencias térmicas de diseño.

Barcelona				F_c Rcontribution	1,0384
Composición constructiva	e (cm)	λ_{CTE} (W/mK)	λ_{Corregida} (W/mK)	R_T (m²K/W)	R_{TOTAL} (m²K/W)
Aire exterior				0,040	2,821
Teja cerámica	1	1	1,04	0,010	
Impermeabilización	0,15	0,25	0,26	0,006	
Aislamiento poliestireno extruido	8	0,031	0,03	2,485	
Forjado unidireccional hormigón	30	1,6	1,66	0,181	
Aire interior				0,100	
Sevilla				F_c Rcontribution	1,0437
Composición constructiva	e (cm)	λ_{CTE} (W/mK)	λ_{Corregida} (W/mK)	R_T (m²K/W)	R_{TOTAL} (m²K/W)
Aire exterior				0,040	1,741
Solería cerámica	1	1	1,04	0,010	
Mortero de regularización (M-5)	4	0,85	0,89	0,045	
Impermeabilización	0,15	0,25	0,26	0,006	
Aislamiento de poliestireno expandido	4	0,03	0,03	1,277	
Hormigón ligero formación de pendientes	10	1,15	1,20	0,083	
Forjado reticular de hormigón	30	1,6	1,67	0,180	
Aire interior				0,100	
Madrid				F_c Rcontribution	1,0349
Composición constructiva	e (cm)	λ_{CTE} (W/mK)	λ_{Corregida} (W/mK)	R_T (m²K/W)	R_{TOTAL} (m²K/W)
Aire exterior				0,040	2,643
Impermeabilización	0,15	0,25	0,26	0,006	
Aislamiento de lana mineral	8	0,031	0,03	2,494	
Barrera de vapor	0,15	0,42	0,43	0,003	
Aire interior				0,100	

Tabla 6.3 Proceso de validación del ajuste del método propuesto.

Comparando los resultados obtenidos del ajuste con respecto a los calculados anteriormente, se observa una mejora en algunas de las cubiertas analizadas.

Un desarrollo más exhaustivo de este ajuste podría servir para tabular factores correctores de acuerdo a la zona climática del emplazamiento y la configuración de cubierta seleccionada en base al CEC [6], afinando todavía más el ajuste obtenido, al tiempo que se mantiene la simplicidad de la corrección.

Localización	R_T Rcontribution (m²K/W)	R_T ISO (m²K/W)	Error respecto ISO
Barcelona	2,821	2,828	0,25%
Sevilla	1,741	1,755	0,81%
Madrid	2,643	2,666	0,89%

Tabla 6.4 Comparativa resultados del ajuste del método propuesto.

Se proporciona a modo esquemático el proceso los diagramas de flujo del proceso de ajuste del método. Representado en verde la diferenciación con respecto a los métodos heurístico y analítico desarrollados.

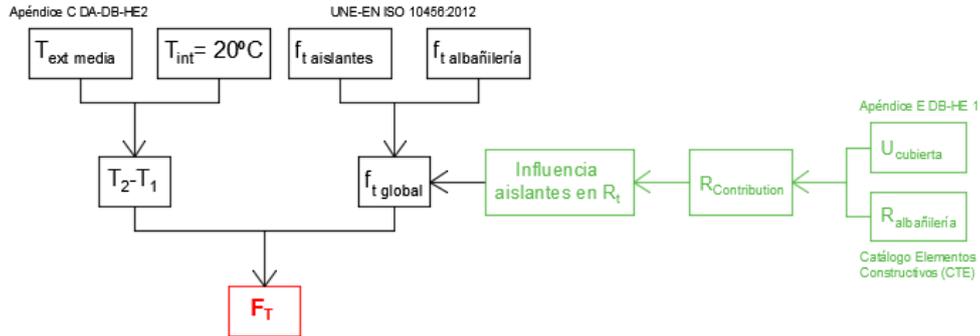


Figura 6.2 Diagrama de flujo para el ajuste en el cálculo del factor de corrección de temperatura.

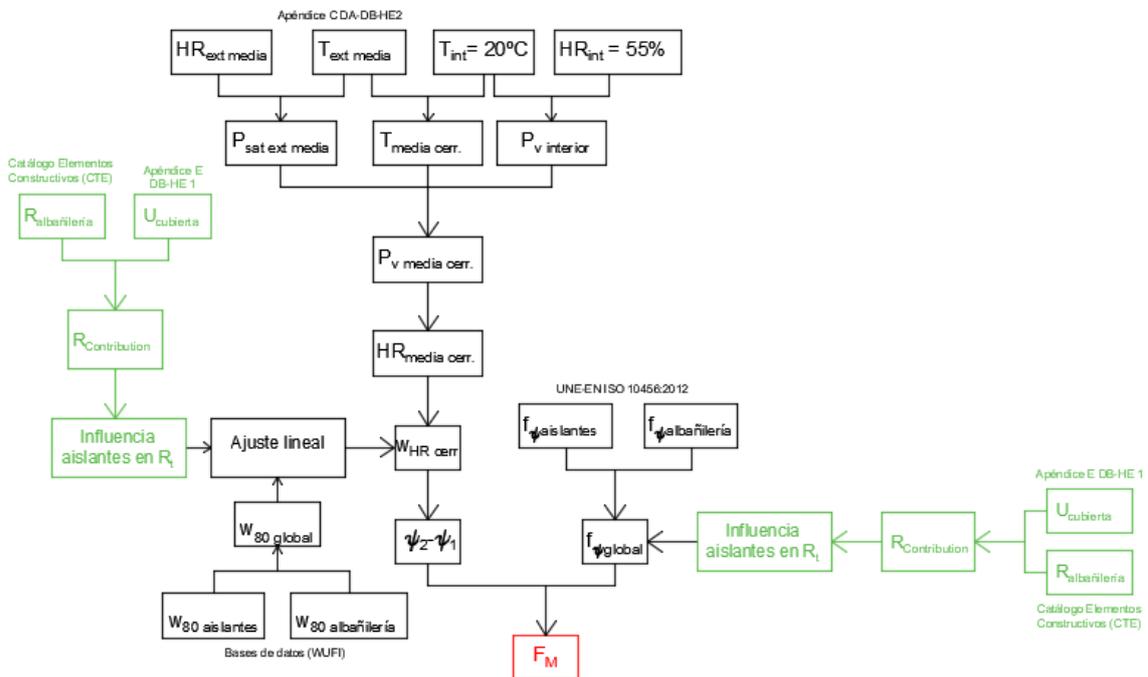


Figura 6.3 Diagrama de flujo para el ajuste en el cálculo del factor de corrección de humedad.

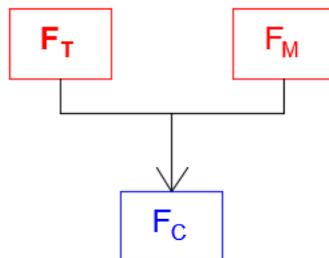


Figura 6.4 Diagrama de flujo para el ajuste en el cálculo del factor corrector de diseño.

7. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado ha puesto de manifiesto, las posibilidades de mejora existentes en el cálculo térmico actual de los cerramientos, los cuales incurren en una inexactitud variable en cada lugar al asumir unas condiciones de temperatura y humedad relativa constantes para todos los materiales.

Esta simplificación, avalada por el Código Técnico de la Edificación para evitar los laboriosos cálculos que precisaría aplicar la norma UNE-EN ISO 10456:2012, provoca unos errores en la caracterización de la conductividad térmica de los materiales de cubierta que va desde un 2,5 hasta un 5 % en función del emplazamiento donde se ubica la misma (llegando a ser muy superiores en situaciones anuales de altas temperaturas, como la época estival).

Como es lógico, este error es más acusado en aquellas poblaciones donde se presentan temperaturas y humedades relativas elevadas (principalmente localizaciones costeras), dada la mayor diferencia respecto de las condiciones de referencia establecidas para el CTE (10 °C y contenido de humedad en equilibrio a 23 °C y 50 % de humedad relativa).

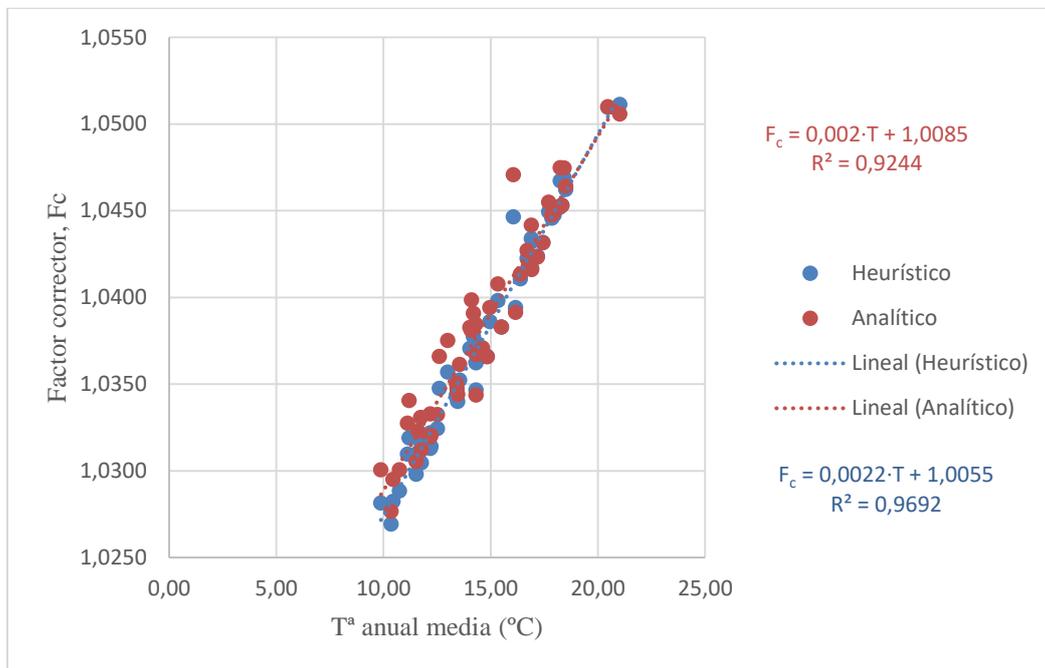


Figura 7.1 Correlación entre la temperatura anual media y el factor de corrección.

Tal y como se aprecia, el factor corrector es fuertemente dependiente de la temperatura del lugar, siendo este el factor de ajuste más relevante.

En vista de los resultados obtenidos, una posibilidad que podría articularse sería la modificación de las condiciones (I-b) de temperatura y humedad establecidas por el

documento, por otras más realistas (II-b) para el cálculo de las conductividades térmicas de diseño.

Propiedad	Conjunto de condiciones			
	I (10 °C)		II (23 °C)	
	a)	b)	a)	b)
Temperatura de referencia	10 °C	10 °C	23 °C	23 °C
Humedad	w_{seco}^a	$w_{23,50}^b$	w_{seco}^a	$w_{23,50}^b$
Envejecimiento	envejecido	envejecido	envejecido	envejecido

^a w_{seco} es un contenido de humedad bajo conseguido mediante secado de acuerdo con las especificaciones o normas del producto correspondiente.
^b $w_{23,50}$ es el contenido de humedad cuando hay equilibrio con el aire a 23 °C y humedad relativa de 50%.

Figura 7.2 Condiciones de valor declarado. Fuente: UNE-EN ISO 10456:2012 [4].

En cualquier caso, la adopción de un conjunto diferente de condiciones de referencia, constante para todos los emplazamientos, no resuelve el objetivo de “*alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad*” establecido por el CTE [2]. Esto es, de alcanzar un diseño prestacional o un código de construcción basado en prestaciones (performance-based building code).

Con objeto de solventar esta problemática, se ha expuesto un método de cálculo de la conductividad térmica de diseño, el cual, combina la funcionalidad y agilidad del proceso descrito por el CTE, con una exactitud similar o próxima la que aporta el método recogido por la norma UNE-EN ISO 10456:2012 [4].

Analizando diferentes variantes del método y procediendo a su ajuste para materiales de cubierta, se ha podido contrastar la aplicabilidad del mismo, así como, la mejora sustancial que permite para el adecuado diseño térmico de la envolvente de cubierta.

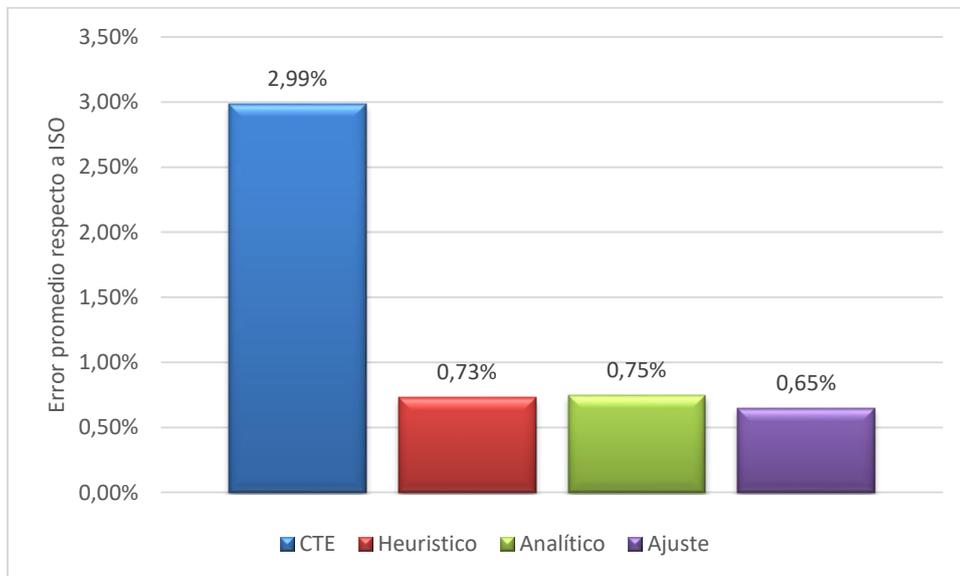


Figura 7.3 Comparativa del error medio cometido con cada método expuesto respecto al calculado en la UNE-EN ISO 10456:2012.

En una materia como es el ahorro energético, donde existe una tendencia regulativa creciente y más restrictiva, la simple aplicación de un factor corrector al ejecutar el diseño térmico de cubiertas es una tarea que no conlleva esfuerzo alguno a los proyectistas en comparación con las ventajas que supone.

La magnitud de estas correcciones varía desde, porcentajes superiores al 5 % en localidades como Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria, mientras que aquellos emplazamientos que requieren una menor corrección (Ávila, Burgos y Soria) requieren igualmente de un ajuste cercano al 3 %. Evaluando la corrección media en las 52 capitales de provincia analizadas, se puede afirmar que se sitúa en torno al 3,8 %.

El estudio realizado presenta un déficit en el análisis de cubiertas ventiladas debido a la dificultad de analizar qué ocurre en el interior de las mismas. Surgen varias preguntas de difícil respuesta ¿Cómo varía el flujo de aire introducido desde el exterior, dependiendo del espesor de la cámara y el tipo de cubierta? ¿Qué temperatura media se debe considerar en esta capa de aire? Para la resolución de dichas preguntas sería necesario recurrir a métodos experimentales o de simulación para cada caso concreto, que quedan fuera del alcance de este estudio.

Al haberse restringido el análisis de datos al ámbito de las capitales de provincia, el trabajo permite una vía de desarrollo a través de la utilización de datos climatológicos más concretos y exhaustivos, con objeto de poder caracterizar más específicamente, distintas localidades dentro de una misma provincia. En este sentido, el análisis de un número representativo de localidades podría llevar a la elaboración de mapas de isolíneas con los factores correctores aplicables a lo largo de todo el territorio.

Asimismo, se han sentado las bases para la realización de estudios estadísticos que puedan determinar con objetividad, que tipologías de cubiertas son más ejecutadas en el territorio español, que puedan dar lugar a ajustes en los porcentajes de influencia de los materiales aislantes.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDAE. *Estudios, informes y estadísticas*. Disponible en la web: <http://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion>
- [2] España. Ministerio de Vivienda. 2006. *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Documento básico DB-HE. Exigencias básicas de ahorro de energía. Actualización: junio 2017*.
- [3] Abdou, A.A; Budaiwi, I.M. 2005. *Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperatures*. Journal of Building Physics, 29 (2), 171.184.
- [4] AENOR UNE-EN ISO 10456:2012. *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*.
- [5] Pérez Bella, J.M. 2012. *Parametrización de la exposición a la humedad y de los ensayos de estanqueidad en cerramientos de edificación: Caracterización prestacional de su comportamiento higrotérmico*. ISSN 2254-7606.
- [6] España. Ministerio de Vivienda. 2010. *Catálogo de elementos constructivos del CTE. Actualización: marzo 2010*.
- [7] CYPE Ingenieros. *Generador de precios de la construcción. Cubiertas*. Disponible en la Web: http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cubiertas.html
- [8] AENOR UNE-EN ISO 12571:2000. 2000b. *Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificios. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica*.
- [9] WUFI Pro Ver. 5.0. *Wärme und Feuchte instationär. Moisture Transport In Building Materials. Computer Simulation with the WUFI Model. WUFI Material Parameters and Moisture Storage Function*. Disponible en la web: <https://wufi.de/en/>
- [10] Künzle, H.M. 1995. *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and-two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart, GER: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN 3-8167-4103-7.
- [11] Krus, M. 1996. *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials. Theoretical principles and new test methods*. Stuttgart, GER: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN 3-8167-4535-0.