

05-020

OPTIMIZING THE THERMAL ENVELOPE OF A SINGLE-FAMILY DWELLING IN LOGROÑO (SPAIN) AND VERIFYING ITS COMPLIANCE WITH THE CTE-DB-HE

Las Heras Casas, Jesús ⁽¹⁾; López Ochoa, Luis María ⁽¹⁾; López González, Luis María ⁽¹⁾; García Lozano, César ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de La Rioja

The building sector is responsible for 40% of the final energy consumption in the European Union. Given this problem, the Energy Performance of Buildings Directive, transposed in all countries of the European Union, requires limitations on the energy consumption and energy demand of buildings. Energy demand is limited by reducing the thermal transmittance of the elements comprising the thermal envelope—specifically, increasing the thermal insulation thickness of the opaque elements. The objective of this work is to determine the optimal thermal insulation thickness of walls and roofs and to minimize both the total heating cost and the total heating and cooling cost of a newly constructed single-family dwelling in Logroño (Spain) by applying the life-cycle cost analysis method. The energy and environmental impact of this optimized thermal envelope is evaluated by thermal simulation with Unified Tool LIDER-CALENER. In addition, the work verifies compliance with the Basic Document of Energy Saving in Buildings of the Technical Building Code (CTE-DB-HE) and determines whether a nearly zero-energy building is achieved.

Keywords: optimized thermal insulation thickness; life-cycle cost analysis; CTE-DB-HE; residential sector; nearly zero-energy consumption building

OPTIMIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LOGROÑO (ESPAÑA) Y COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DEL CTE-DB-HE

El sector edificatorio es responsable del 40% del consumo de energía final de la Unión Europea. Ante esta problemática, la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios, transpuesta en todos los países de la Unión Europea, exige la limitación del consumo y de la demanda energética de los edificios. La demanda energética se limita reduciendo las transmitancias térmicas de los elementos que componen la envolvente térmica, aumentando los espesores de aislamiento térmico de los elementos opacos. El objetivo de este trabajo es determinar el espesor de aislamiento térmico óptimo de muros y cubierta, con el que minimizar tanto el coste de calefacción total como el coste de calefacción y refrigeración total de una vivienda unifamiliar de nueva construcción en Logroño (España) aplicando el método del análisis del coste del ciclo de vida. Se evalúa el impacto energético y medioambiental de dicha envolvente térmica optimizada mediante simulación térmica con la Herramienta Unificada LIDER-CALENER. Además, se comprueba el cumplimiento del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-DB-HE) y si se logra conseguir un edificio de consumo de energía casi nulo.

Palabras clave: espesor de aislamiento térmico optimizado; análisis del coste del ciclo de vida; CTE-DB-HE; sector residencial; edificio de consumo de energía casi nulo

Correspondencia: Luis María López González luis-maria.lopez@unirioja.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El sector edificatorio es responsable del 40% del consumo de energía final de la Unión Europea (Unión Europea, 2010). Como respuesta a esta problemática surgen tanto la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios (EPBD) 2002 (Comunidad Europea, 2002) como la EPBD 2010 (Unión Europea, 2010), las cuales han sido transpuestas en todos los países de la Unión Europea y exigen la limitación del consumo y de la demanda energética de los edificios.

La demanda energética se limita reduciendo las transmitancias térmicas de los elementos que componen la envolvente térmica, aumentando los espesores de aislamiento térmico de los elementos opacos. Sin embargo, es necesario buscar el equilibrio entre el coste del aislante empleado y los posibles ahorros en calefacción y refrigeración mediante métodos como el del análisis del coste del ciclo de vida.

La EPBD 2010 (Unión Europea, 2010) fue transpuesta a la legislación nacional española, en una primera fase, a través del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-DB-HE) 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017), reemplazando el anterior CTE-DB-HE, fruto de la transposición de la EPBD 2002 (Comunidad Europea, 2002). Posteriormente, se transpuso la EPBD 2010 (Unión Europea, 2010), en una segunda fase, a través del CTE-DB-HE 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019).

El CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) incluyó como definición del edificio de consumo de energía casi nulo, que era aquel edificio que cumple el CTE-DB-HE vigente como edificio de nueva construcción. Actualmente, al encontrarse España en un periodo de transición del CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) al CTE-DB-HE 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019), se podría hablar de que existen edificios de consumo de energía casi nulo de primera generación y de segunda generación, según cumplan el CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) o el CTE-DB-HE 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019).

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es determinar el espesor de aislamiento térmico óptimo de muros y cubierta, con el que minimizar tanto el coste de calefacción total como el coste de calefacción y refrigeración total de una vivienda unifamiliar de nueva construcción en Logroño (España) aplicando el método del análisis del coste del ciclo de vida. Se evalúa el impacto energético y medioambiental de dicha envolvente térmica optimizada mediante simulación térmica con la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC, 2017). Además, se comprueba el cumplimiento del CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) y del CTE-DB-HE 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019) y si se logra conseguir un edificio de consumo de energía casi nulo.

3. Metodología

3.1 Método del análisis del coste del ciclo de vida

Mediante el método del análisis del coste del ciclo de vida, se han determinado el espesor de aislamiento térmico óptimo de cerramientos opacos con el que minimizar el coste de calefacción total y el coste de calefacción y refrigeración total de una vivienda, x_{opt}^{calef} y $x_{opt}^{cal+ref}$, respectivamente, ambos en m. Para calcular estos espesores de aislante óptimos se emplean

las siguientes ecuaciones, que han sido extraídas y adaptadas de Kurekci (2016) y López-Ochoa et al. (2020):

$$x_{opt}^{calef} = \left(\frac{0,024 \cdot GDC \cdot p_{comb} \cdot FVA \cdot \lambda}{p_{aisl} \cdot \eta} \right)^{0,5} - \lambda \cdot R_{no\ aisl} \quad (1)$$

$$x_{opt}^{cal+ref} = \left[\frac{0,024 \cdot FVA \cdot \lambda}{p_{aisl}} \cdot \left(\frac{GDC \cdot p_{comb}}{\eta} + \frac{GDR \cdot p_{elect}}{\varepsilon} \right) \right]^{0,5} - \lambda \cdot R_{no\ aisl} \quad (2)$$

donde GDC son los grados-día de calefacción, GDR son los grados-día de refrigeración, p_{comb} es el precio del combustible empleado para calefacción, en €/kWh, p_{elect} es el precio de la energía eléctrica empleada para refrigeración, en €/kWh, p_{aisl} es el precio del aislante térmico empleado, en €/m³, η es el rendimiento térmico de la caldera empleada, en tanto por uno, ε es la eficiencia térmica del sistema de producción de frío empleado, en tanto por uno, FVA es el factor del valor actual, λ es la conductividad térmica del material aislante del cerramiento opaco, en m·K/W, y $R_{no\ aisl}$ es la resistencia térmica del cerramiento opaco sin considerar la resistencia térmica correspondiente a la capa de aislante, en m²·K/W.

El cálculo de FVA depende de la relación existente entre la tasa de interés, i , en tanto por uno, y de la tasa de inflación, g , en tanto por uno. En este trabajo, al ser i mayor que g , FVA se calcula con la siguiente ecuación:

$$FVA = \frac{\left(1 + \frac{i-g}{1+g}\right)^N - 1}{\frac{i-g}{1+g} \cdot \left(1 + \frac{i-g}{1+g}\right)^N} \quad (3)$$

donde N es el periodo de vida útil, en años.

$R_{no\ aisl}$ se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_{no\ aisl} = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se} \quad (4)$$

donde R_{si} y R_{se} son las resistencias térmicas superficiales interior y exterior, respectivamente, en m²·K/W, y R_i es la resistencia térmica de cada capa i del cerramiento opaco estudiado, sin considerar la resistencia térmica correspondiente a la capa de aislante, R_{aisl} , ambas en m²·K/W, calculándose R_i y R_{aisl} con las siguientes ecuaciones:

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (5)$$

$$R_{aisl} = \frac{x_{opt}}{\lambda} \quad (6)$$

donde e_i es el espesor de la capa i del cerramiento opaco, en m, λ_i es la conductividad térmica del material de la capa i del cerramiento opaco, en m·K/W, y x_{opt} es x_{opt}^{calef} y $x_{opt}^{cal+ref}$, según sea el caso en m.

Finalmente, la transmitancia térmica del cerramiento opaco, U , en W/m²·K, se calcula con la siguiente ecuación:

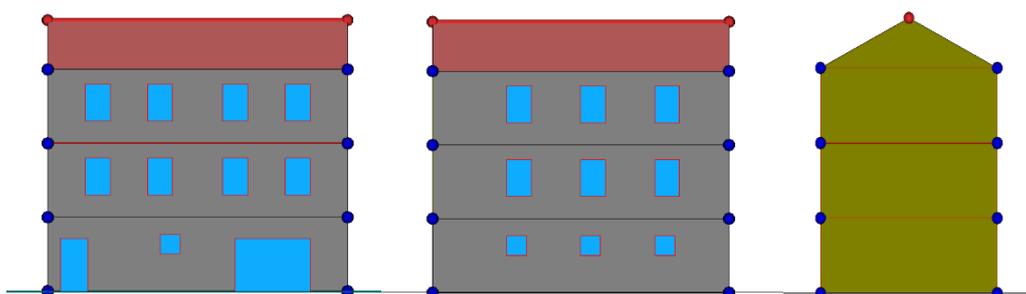
$$U = \frac{1}{R_{no\ aisl} + R_{aisl}} \quad (7)$$

3.2 Edificio de estudio y casos de estudio

La vivienda unifamiliar objeto de estudio fue empleada para evaluar la evolución del CTE-DB-HE en López Ochoa et al. (2019) (Figura 1). Está formada por planta baja y dos alturas, con una base de 84,00 m² y está ubicada en Logroño (La Rioja), correspondiéndole la zona

climática D2 según el CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) y el CTE-DB-HE 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019). La fachada principal está orientada al sur y limita tanto al este como al oeste con otras viviendas unifamiliares. La planta baja no está acondicionada, estando utilizada como garaje y almacén-trastero. Tanto la primera planta como la segunda están acondicionadas, teniendo un total de cuatro dormitorios, sumando una superficie habitable de 168,00 m². El volumen encerrado por la envolvente térmica del edificio es de 840,00 m³ y la superficie de intercambio térmico de dicha envolvente es de 396,74 m², resultando su compacidad de 2,12 m³/m².

Figura 1: Cara sur, cara norte y caras este y oeste de la vivienda unifamiliar objeto de estudio.



Para evaluar todos los parámetros relativos al impacto energético y medioambiental de la vivienda unifamiliar objeto de estudio, cuya envolvente térmica es optimizada mediante el método del análisis del coste del ciclo de vida, se consideran los siguientes casos:

- Caso 1: Edificio cuyos espesores de aislante óptimos para muros y cubierta son aquellos que minimizan el coste de calefacción total y cuyas transmitancias térmicas del resto de elementos de la envolvente térmica y de sus particiones interiores, así como sus valores de puentes térmicos, son iguales a los empleados por el edificio que cumple el CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) en López Ochoa et al. (2019).
- Caso 2: Edificio cuyos espesores de aislante óptimos para muros y cubierta son aquellos que minimizan el coste de calefacción y refrigeración total y cuyas transmitancias térmicas del resto de elementos de la envolvente térmica y de sus particiones interiores, así como sus valores de puentes térmicos, son iguales a los empleados por el edificio que cumple el CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) en López Ochoa et al. (2019).
- Caso 3: Edificio cuyos espesores de aislante óptimos para muros y cubierta son aquellos que minimizan el coste de calefacción total y cuyas transmitancias térmicas del resto de elementos de la envolvente térmica y de sus particiones interiores, así como sus valores de puentes térmicos, son iguales a los empleados por el edificio que cumple el proyecto del CTE-DB-HE 2018 (Ministerio de Fomento de España, 2018) en López Ochoa et al. (2019).
- Caso 4: Edificio cuyos espesores de aislante óptimos para muros y cubierta son aquellos que minimizan el coste de calefacción y refrigeración total y cuyas transmitancias térmicas del resto de elementos de la envolvente térmica y de sus particiones interiores, así como sus valores de puentes térmicos, son iguales a los empleados por el edificio que cumple el proyecto del CTE-DB-HE 2018 (Ministerio de Fomento de España, 2018) en López Ochoa et al. (2019).

En todos los casos se evalúan, mediante simulación térmica con HULC (2017), las demandas energéticas, los consumos de energía final, los consumos de energía primaria no renovable,

los consumos de energía primaria total, las emisiones de CO₂, tanto desglosados por servicio como totales, así como las calificaciones de eficiencia energética en consumo de energía primaria no renovable y en emisiones de CO₂. Además, se comprueba qué casos cumplen el CTE-DB-HE 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) y el CTE-DB-HE 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019), como edificio nuevo.

En la Tabla 1 se presentan las superficies de intercambio, las transmitancias térmicas de los diferentes elementos que componen la envolvente térmica y particiones interiores, junto con los correspondientes espesores de aislante poliestireno expandido (EPS), cuya conductividad térmica es de 0,029 W/m·K, requeridos para cada uno de los casos. El factor solar de las ventanas es 0,57 y el de las puertas es 0,05 para dichos casos. Además, las ventanas de las plantas primera y segunda disponen de persianas.

Tabla 1: Superficie de intercambio (A), transmitancias térmicas (U) de los diferentes elementos que componen la envolvente térmica y particiones interiores, en W/m²·K, y espesor (e) de aislante requerido, en mm, para cada caso.

Elemento	A (m ²)	Caso 1 y Caso 2		Caso 3 y Caso 4	
		U (W/m ² ·K)	e (mm)	U (W/m ² ·K)	e (mm)
Cubierta	96,74	*	*	*	*
Muro	183,62	*	*	*	*
Solera	84,00	0,27	90	0,26	95
Medianera	77,00	0,76	25	0,55	40
Particiones interiores verticales entre espacios del mismo uso	-	1,17	10	1,17	10
Forjado entre espacios del mismo uso	-	1,17	10	0,97	15
Forjado entre espacios de distinto uso	-	0,83	20	0,73	25
Ventana	23,56	1,87	-	1,38	-
Puerta	8,82	1,80	-	1,80	-

Nota: * se determina mediante el método del análisis del coste del ciclo de vida.

Las longitudes y las transmitancias térmicas lineales de los puentes térmicos del edificio para cada uno de los casos se presentan en la Tabla 3. Para el Caso 1 y el Caso 2 se tienen en cuenta las longitudes y las transmitancias térmicas lineales de los puentes térmicos por defecto según HULC (2017) y para el Caso 3 y el Caso 4 se han evaluado según Documento de Apoyo 3 al CTE-DB-HE (Ministerio de Fomento de España, 2014).

Tabla 3: Longitudes (l) y transmitancias térmicas lineales (Ψ) de los puentes térmicos del edificio objeto de estudio para cada caso.

Puentes térmicos	l (m)	Caso 1 y Caso 2	Caso 3 y Caso 4
		Ψ (W/m·K)	Ψ (W/m·K)
Frentes de forjados	48,00	0,97	0,11
Cubiertas-Forjado	36,00	0,96	0,22
Alfeizar	21,30	0,44	0,08

Dinteles/Capialzados	21,30	0,82	0,09
Jambas	57,00	0,53	0,03
Pilares	1,00	1,20	0,00
Muro-Terreno	19,90	0,57	0,39

Las resistencias térmicas de las distintas capas que componen los muros y la cubierta del edificio de estudio, ordenados de exterior a interior, se muestran en la Tabla 4. Las resistencias superficiales se han obtenido del Documento de Apoyo 1 al CTE-DB-HE (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana de España, 2020).

Tabla 4: Composición de muros y cubierta del edificio objeto de estudio.

Elemento	Capa	Material	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m·K)	Resistencia térmica (m ² ·K/W)
Muro	se	-	-	-	0,040
	1	Mortero de cemento	0,025	1,300	0,019
	2	½ pie LM métrico o catalán	0,115	0,991	0,116
	3	Mortero de cemento	0,025	1,300	0,019
	4	EPS	*	0,029	*
	5	Tabicón de LH doble	0,080	0,432	0,185
	6	Yeso de alta dureza	0,020	0,560	0,036
	si	-	-	-	0,130
Cubierta	se	-	-	-	0,040
	1	Teja cerámica	0,020	1,300	0,015
	2	Cloruro de polivinilo (PVC)	0,004	0,170	0,024
	3	Mortero de cemento	0,060	1,300	0,046
	4	FU Entrevigado cerámico	0,250	0,908	0,275
	5	EPS	*	0,029	*
	6	Yeso de alta dureza	0,020	0,560	0,036
	se	-	-	-	0,100

Nota: * se determina mediante el método del análisis del coste del ciclo de vida.

Se emplea una caldera mixta convencional de gas natural con un rendimiento de 0,92 para cubrir las necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS), y un sistema de refrigeración eléctrico con un rendimiento de 2,00 para cubrir las necesidades de refrigeración.

Además, se apoya la caldera empleada con un sistema solar térmico para cubrir parte de las necesidades de ACS. Se ha considerado una demanda de ACS a 60°C de 140 l/día para todos los casos y una contribución solar del 40% para el Caso 1 y el Caso 2, y del 60% para el Caso 3 y el Caso 4.

Los factores de paso empleados por HULC (2017) de energía final a energía primaria total, a energía primaria no renovable y a emisiones de CO₂ se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Factores de paso

Factor de paso de energía final	Vector energético	
	Gas natural	Electricidad
a energía primaria total (kWh _{EPT} /kWh _{EF})	1,195	2,368
a energía primaria no renovable (kWh _{EPNR} /kWh _{EF})	1,190	1,954
a emisiones de CO ₂ (kg CO ₂ /kWh _{EF})	0,252	0,331

Además, para el análisis del coste del ciclo de vida, se van a considerar 2.466 grados-día de calefacción y 243 grados-día de refrigeración para una temperatura base de 20°C, obtenidos de la estación meteorológica de Logroño-Agoncillo (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2014); y como principales parámetros económicos, una tasa de interés anual del 5,00%, una tasa anual de inflación del 2,50% y un periodo de vida útil de 30 años, así como un precio para el EPS de 263,78 €/m³, un precio para el gas natural de 0,077 €/kWh y un precio para la energía eléctrica de 0,243 €/kWh.

3.3 Cumplimiento del CTE-DB-HE 2013 y del CTE-DB-HE 2019

Mientras que el CTE-DB-HE0 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) exige para limitar el consumo energético del edificio de estudio que el consumo de energía primaria no renovable no supere un valor de 77,86 kWh/m²·año, el CTE-DB-HE0 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019) exige que el consumo de energía primaria no renovable no supere un valor de 38,00 kWh/m²·año y que el consumo de energía primaria total no supere un valor de 76,00 kWh/m²·año.

Por un lado, el CTE-DB-HE1 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) exige para la limitación de la demanda energética del edificio de estudio que la demanda energética de calefacción no debe superar un valor de 38,90 kWh/m²·año y que la demanda energética de refrigeración no debe superar un valor de 15,00 kWh/m²·año. Por otro lado, el CTE-DB-HE1 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019) exige para el control de la demanda energética del edificio que el coeficiente global de transmisión de calor a través de la envolvente térmica del edificio de estudio no debe superar un valor de 0,55 W/m²·K; que el parámetro de control solar para julio no debe superar el valor de 2,00 kWh/m²·mes; que la permeabilidad al aire de huecos pertenecientes a la envolvente térmica no debe superar un valor de 9 m³/h·m²; y que el valor de la relación del cambio de aire con una presión diferencial de 50 Pa no debe superar un valor de 5,82 h⁻¹. Además, de todo lo anterior, tanto el CTE-DB-HE1 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) como el CTE-DB-HE1 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019) exigen que la transmitancia térmica de cada elemento perteneciente a la envolvente térmica y de las particiones interiores no puede superar su correspondiente valor límite establecido; y que no deben producirse condensaciones ni intersticiales ni superficiales en la envolvente térmica del edificio.

Finalmente, el CTE-DB-HE4 2013 (Ministerio de Fomento de España, 2013a, 2013b, 2017) exige que el 40% de la demanda energética de ACS del edificio de estudio fuera cubierta

mediante energía renovable (energía solar térmica) y el CTE-DB-HE4 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019) aumenta esta exigencia hasta el 60%.

El coeficiente global de transmisión de calor, el parámetro de control solar, la relación de cambio de aire y la comprobación de la no existencia de condensaciones se evalúan según lo indicado en el CTE-DB-HE 2019 (Ministerio de Fomento de España, 2019), el Documento de Apoyo 1 al CTE-DB-HE (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana de España, 2020), el Documento de Apoyo 2 al CTE-DB-HE (Ministerio de Fomento de España, 2013c) y el Documento de Apoyo 3 al CTE-DB-HE (Ministerio de Fomento de España, 2014).

4. Resultados

En la Tabla 7 se presentan las transmitancias térmicas de muros y cubierta del edificio junto con el espesor óptimo de aislante EPS requerido para cada caso. En el Caso 2 y en el Caso 4 hay que añadir 8 mm de espesor de aislante para los muros y 7 mm de espesor de aislante para la cubierta respecto al Caso 1 y al Caso 2, reduciéndose las transmitancias térmicas de muros y cubierta un 7,41%.

Tabla 7: Transmitancias térmicas (U) de muros y cubierta del edificio, en W/m²·K, y espesor (e) de aislante requerido, en mm, para cada caso.

Elemento	Caso 1 y Caso 3		Caso 2 y Caso 4	
	U (W/m ² ·K)	e (mm)	U (W/m ² ·K)	e (mm)
Cubierta	0,27	92	0,25	99
Muro	0,27	91	0,25	99

En la Tabla 8 se presentan todos los parámetros energéticos y medioambientales, así como las calificaciones de eficiencia energética, obtenidos para todos los casos de estudio. Cabe destacar que el Caso 1 y el Caso 2 obtienen una calificación de eficiencia energética tanto en consumo de energía primaria no renovable como en emisiones de CO₂ de B y que el Caso 3 y el Caso 4 obtienen una calificación de eficiencia energética tanto en consumo de energía primaria no renovable como en emisiones de CO₂ de A.

Tabla 8: Resultados de los parámetros energéticos y medioambientales evaluados en todos los casos de estudio.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Demanda energética de calefacción (kWh/m ² ·año)	38,01	37,10	16,49	15,63
Demanda energética de refrigeración (kWh/m ² ·año)	6,79	6,81	7,09	7,14
Demanda energética de ACS (kWh/m ² ·año)	16,85	16,85	16,85	16,85
Consumo de energía final de calefacción (kWh/m ² ·año)	41,32	40,33	17,92	16,99
Consumo de energía final de refrigeración (kWh/m ² ·año)	3,40	3,41	3,55	3,57
Consumo de energía final de ACS (kWh/m ² ·año)	10,99	10,99	7,33	7,33
Consumo de energía final (kWh/m ² ·año)	55,70	54,72	28,80	27,89

Consumo de energía primaria no renovable de calefacción (kWh/m ² ·año)	49,17	47,99	21,33	20,22
Consumo de energía primaria no renovable de refrigeración (kWh/m ² ·año)	6,63	6,65	6,93	6,98
Consumo de energía primaria no renovable de ACS (kWh/m ² ·año)	13,08	13,08	8,72	8,72
Consumo de energía primaria no renovable (kWh/m ² ·año)	68,88	67,72	36,97	35,91
Calificación en consumo de energía primaria no renovable (-)	B	B	A	A
Consumo de energía primaria total de calefacción (kWh/m ² ·año)	49,37	48,19	21,42	20,30
Consumo de energía primaria total de refrigeración (kWh/m ² ·año)	8,04	8,06	8,39	8,45
Consumo de energía primaria total de ACS (kWh/m ² ·año)	13,13	13,13	8,75	8,75
Consumo de energía primaria total (kWh/m ² ·año)	70,54	69,38	38,57	37,51
Emisiones de CO ₂ de calefacción (kg CO ₂ /m ² ·año)	10,41	10,16	4,52	4,28
Emisiones de CO ₂ de refrigeración (kWh/m ² ·año)	1,12	1,13	1,17	1,18
Emisiones de CO ₂ de ACS (kg CO ₂ /m ² ·año)	2,77	2,77	1,85	1,85
Emisiones de CO ₂ (kg CO ₂ /m ² ·año)	14,30	14,06	7,54	7,31
Calificación en emisiones de CO ₂ (-)	B	B	A	A

En la Tabla 9 se comprueba el cumplimiento del CTE-DB-HE 2013 y del CTE-DB-HE 2019 de todos los casos de estudio. El Caso 1 y el Caso 2 cumplen únicamente el CTE-DB-HE 2013, mientras que el Caso 3 y el Caso 4 cumplen tanto el CTE-DB-HE 2013 como el CTE-DB-HE 2019. Por lo tanto, el Caso 1 y el Caso 2 logran ser edificios de consumo de energía casi nulo de primera generación y el Caso 3 y el Caso 4 logran ser edificios de consumo de energía casi nulo tanto de primera como de segunda generación.

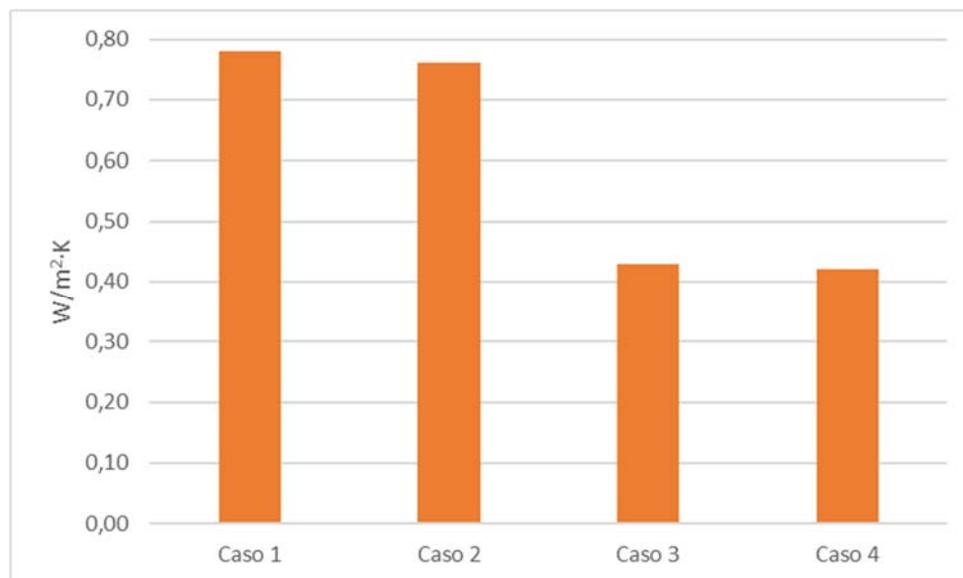
Tabla 9: Comprobación del cumplimiento del CTE-DB-HE 2013 y del CTE-DB-HE 2019.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Consumo de energía primaria no renovable (kWh/m ² ·año)	68,88	67,72	36,97	35,91
Cumplimiento del CTE-DB-HE0 2013	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Demanda energética de calefacción (kWh/m ² ·año)	38,01	37,10	16,49	15,63
Demanda energética de refrigeración (kWh/m ² ·año)	6,79	6,81	7,09	7,14
Cumplimiento del CTE-DB-HE1 2013	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Contribución solar anual (-)	0,40	0,40	0,60	0,60
Cumplimiento del CTE-DB-HE4 2013	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ

Consumo de energía primaria no renovable (kWh/m ² ·año)	68,88	67,72	36,97	35,91
Consumo de energía primaria total (kWh/m ² ·año)	70,54	69,38	38,57	37,51
Cumplimiento del CTE-DB-HE0 2019	NO	NO	SÍ	SÍ
Coefficiente global de transmisión de calor (W/m ² ·K)	0,78	0,76	0,43	0,42
Parámetro de control solar (kWh/m ² ·mes)	0,22-1,03	0,22-1,03	0,22-1,03	0,22-1,03
Permeabilidad al aire de los huecos (m ³ /h·m ²)	27	27	9	9
Relación del cambio de aire (h ⁻¹)	8,57	8,57	4,58	4,58
Cumplimiento del CTE-DB-HE1 2019	NO	NO	SÍ	SÍ
Contribución de energía renovable (-)	0,40	0,40	0,60	0,60
Cumplimiento del CTE-DB-HE4 2019	NO	NO	SÍ	SÍ

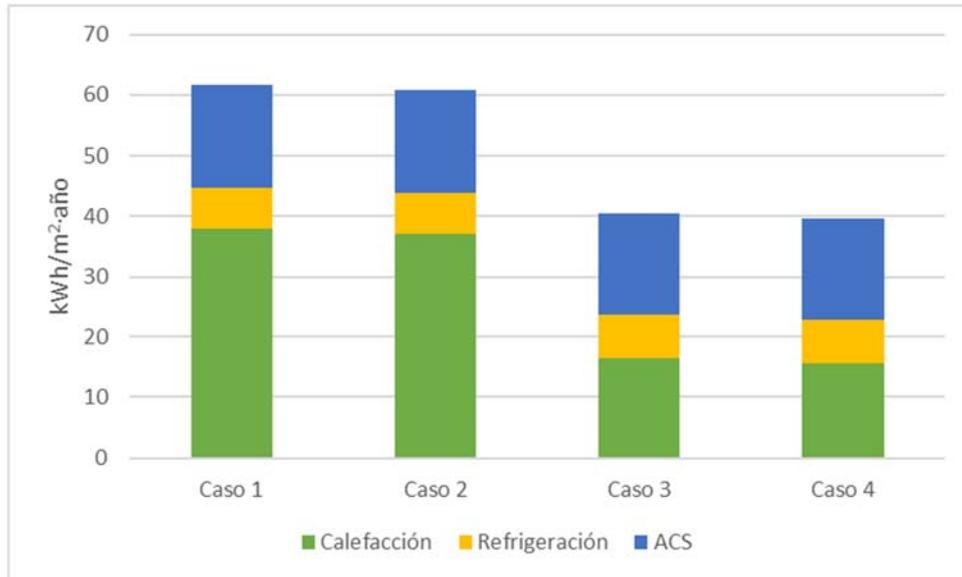
En la Figura 2 se muestran los coeficientes globales de transmisión de calor a través de la envolvente térmica del edificio para cada caso. El coeficiente global de transmisión de calor a través de la envolvente térmica del edificio en el Caso 3 es un 44,87% inferior al coeficiente correspondiente en el Caso 1 y en el Caso 4 es un 44,74% inferior al coeficiente correspondiente en el Caso 2.

Figura 2: Coeficientes globales de transmisión de calor a través de la envolvente térmica del edificio para cada caso.



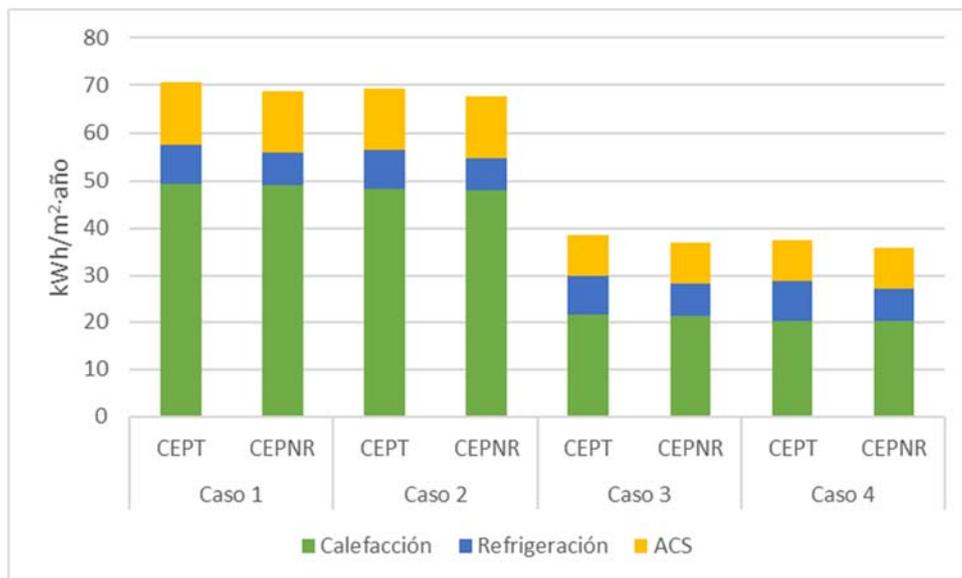
En la Figura 3 se muestran las demandas energéticas de calefacción, refrigeración y ACS para cada caso. La demanda energética de ACS es igual para todos los casos. Por un lado, la demanda energética de calefacción en el Caso 3 se reduce un 56,62% respecto al Caso 1, mientras que en el Caso 4 se reduce un 57,87% respecto al Caso 2. Por otro lado, la demanda energética de refrigeración en el Caso 3 aumenta un 4,42% respecto al Caso 1 y en el Caso 4 aumenta un 4,85% respecto al Caso 2.

Figura 3: Demandas energéticas de calefacción, refrigeración y ACS para cada caso.



En la Figura 4 se muestran los consumos de energía primaria total y los consumos de energía primaria no renovable de calefacción, refrigeración y ACS para cada caso. El consumo de energía primaria total y el consumo de energía primaria no renovable en el Caso 3 se reducen un 45,33% y un 46,32%, respectivamente, respecto al Caso 1; mientras que en el Caso 4 se reducen un 45,94% y un 46,97%, respectivamente, respecto al Caso 2.

Figura 4: Consumo de energía primaria total (CEPT) y consumo de energía primaria no renovable (CEPNR) de calefacción, refrigeración y ACS para cada caso.



5. Conclusiones

En este trabajo se ha evaluado el espesor de aislante térmico óptimo para una vivienda unifamiliar en Logroño (La Rioja), mediante el método del análisis del coste del ciclo de vida.

Las soluciones presentadas demuestran que, buscando el equilibrio entre el coste del aislante empleado y los posibles ahorros en calefacción y/o calefacción y refrigeración en dicho

edificio, es posible cumplir tanto el CTE-DB-HE 2013 como el CTE-DB-HE 2019 y lograr edificios de consumo de energía casi nulo. Además, este trabajo muestra la importancia de los puentes térmicos y la necesidad de no romper la continuidad del aislante en o entre los diferentes elementos de la envolvente térmica, siendo esto último imprescindible para poder cumplir el CTE-DB-HE 2019.

El consumo de energía primaria no renovable del Caso 1, del Caso 2, del Caso 3 y del Caso 4 están un 11,54%, un 13,03%, un 52,51% y un 53,88%, respectivamente, por debajo del consumo de energía primaria no renovable exigido por el CTE-DB-HE 2013.

El consumo de energía primaria no renovable del Caso 3 y del Caso 4 están un 2,70% y un 5,50%, respectivamente, por debajo del consumo de energía primaria no renovable exigido por el CTE-DB-HE 2019; y el consumo de energía primaria total del Caso 3 y del Caso 4 están un 49,25% y un 50,64%, respectivamente, por debajo del consumo de energía primaria total exigido por el CTE-DB-HE 2019.

Finalmente, este trabajo puede ser replicable en otras ciudades de España y permite optimizar la envolvente térmica de los edificios de nueva construcción de forma sostenible.

Referencias

- Comunidad Europea (2002). Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091&from=ES>.
- HULC (2017). Herramienta Unificada LIDER-CALENER, Versión 1.0.1564.1124 [consultado en 12.04.2019]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener.html>.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2014). Programa Frecuencias, Versión 1.2 [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_FRECUENCIAS_71e4fba3.exe.
- 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, 197–213, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.004>.
- López Ochoa, L. M., Las Heras Casas, J., López González, L. M., & Sagredo Blanco, E. (2019). Impacto energético y medioambiental de la evolución del CTE-DB-HE en una vivienda unifamiliar en Logroño (La Rioja). *Proceedings from the 23rd International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 1287-1298). Málaga: AEIPRO. Disponible en: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2330>.
- López-Ochoa, L. M., Las-Heras-Casas, J., López-González, L. M., & García-Lozano, C. (2020). Energy Renovation of Residential Buildings in Cold Mediterranean Zones Using Optimized Thermal Envelope Insulation Thicknesses: The Case of Spain. *Sustainability*, 12, 2287, <https://doi.org/10.3390/su12062287>.
- Ministerio de Fomento de España (2013a). Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía, del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/09/12/pdfs/BOE-A-2013-9511.pdf>.
- Ministerio de Fomento de España (2013b). Corrección de errores de la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/11/08/pdfs/BOE-A-2013-11688.pdf>.

- Ministerio de Fomento de España (2013c). Documento de Apoyo 2 al CTE-DB-HE: Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DA-DB-HE-2_-_Condensaciones.pdf.
- Ministerio de Fomento de España (2014). Documento de Apoyo 3 al CTE-DB-HE: Puentes térmicos [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DA-DB-HE-3_Puentes_termicos.pdf.
- Ministerio de Fomento de España (2017). Orden FOM/588/2017, de 15 de junio, por la que se modifican el Documento Básico DB-HE “Ahorro de energía” y el Documento Básico DB-HS “Salubridad”, del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2017/06/23/pdfs/BOE-A-2017-7163.pdf>.
- Ministerio de Fomento de España (2018). Proyecto de Real Decreto por el que se modifica el RD 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-complementarios/357-proyecto-modificacion-cte-julio-2018.html>.
- Ministerio de Fomento de España (2019). Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2019/12/27/pdfs/BOE-A-2019-18528.pdf>.
- Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana de España (2020). Documento de Apoyo 1 al CTE-DB-HE: Cálculo de parámetros característicos de la envolvente [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf.
- Unión Europea (2010). Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición) [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=ES>.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

