



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
(ICAI)

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

**Medidas de mejora para la eficiencia energética en  
la vivienda**

Autor

Javier Rodríguez Carnicero

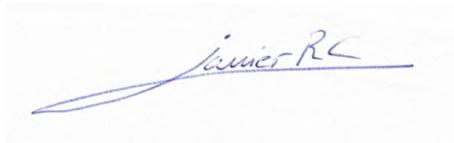
Dirigido por

Íñigo Sanz Fernández

Madrid

Julio 2025

**Javier Rodríguez Carnicero** , declara bajo su responsabilidad, que el Proyecto con título **Medidas de mejora para la eficiencia energética en la vivienda** presentado en la ETS de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2024/25 es de su autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Javier Rodríguez Carnicero

Fecha: 06 / 08 / 2025

Autoriza la entrega:

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

**Íñigo Sanz Fernández**

Fdo.: .....

# Resumen

Este Trabajo de Fin de Máster busca investigar las medidas de mejora de eficiencia energética para el parque de viviendas mediante la mejora de aislamiento térmico y sistemas de climatización. Existe un interés en sistemas eficientes que ayudan a reducir el uso de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero, reducen el consumo energético residencial y se alinean con los nuevos objetivos ambientales y económicos.

El análisis compara los diferentes materiales y técnicas aislantes según sus propiedades térmicas, acústicas y medioambientales con un análisis de los sistemas de aislamiento. Se comparan los sistemas de climatización evaluados por su eficiencia energética y coste operativo y se valora el impacto que tienen las distintas mejoras de eficiencia energética sobre el certificado energético. Además, se explica el procedimiento de obtención de la calificación energética, su documentación, las herramientas que ayudan a evaluar el consumo energético residencial y las ayudas y subvenciones que apoyan la mejora de la eficiencia en edificios residenciales.

Los resultados muestran que la instalación de aislamiento tipo SATE combinada con fachadas ventiladas y bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas ayuda a reducir significativamente el consumo energético.

En conclusión, la implementación de estas medidas busca cumplir con los nuevos requisitos normativos y mejora la sostenibilidad ambiental, al mismo tiempo que incrementa el confort y la calidad de vida en la vivienda.



# Abstract

The aim of this master thesis is to research measures to improve energy efficiency in residential buildings through the improvement of thermal insulation and HVAC systems. With growing interest in efficient systems that reduce the use of fossil fuels and greenhouse gas emissions, solutions that help mitigate residential energy consumption have become a priority for meeting new environmental and economic goals.

The analysis compares different insulating materials on their thermal, acoustic, and environmental properties and gives a comprehensive review of all insulation systems. A comparison between conventional and alternative HVAC systems is evaluated through their energy efficiency and operational cost, showing the impact of their improvements over the energy certification, as well as a thorough explanation of the certificate grading, the tools that help evaluate these measures, and the grants and subsidies that support improvements of these systems in residential buildings.

Results show that the installation of ETICS insulation combined with ventilated façades and geothermal and aerothermal heat pumps helps reduce significantly energy consumption.

In conclusion, adopting these measures seeks to comply with new regulatory requirements and enhances environmental sustainability while improving comfortability and living standards.



# Contents

<b>1</b>	<b>Aislamiento Térmico</b>	<b>1</b>
1.1	Conductividad térmica, resistencia y transmitancia . . . . .	2
1.2	Tipos de transferencia térmica . . . . .	3
1.3	Influencia en la eficiencia y el confort . . . . .	4
1.4	Tipología de materiales aislantes . . . . .	5
1.4.1	Materiales sintéticos (petroquímicos) . . . . .	6
1.4.2	Aislamiento mineral . . . . .	9
1.4.3	Aislamiento ecológico . . . . .	10
1.5	Tipología de aplicación del aislamiento térmico . . . . .	16
1.5.1	Aislamiento exterior . . . . .	16
1.5.2	Aislamiento interior . . . . .	19
1.5.3	Aislamiento en cubierta . . . . .	20
1.5.4	Aislamiento en suelos . . . . .	21
1.6	Técnicas de aplicación . . . . .	21
1.6.1	Inyección o insuflado . . . . .	21
1.6.2	Proyección . . . . .	23
1.6.3	Paneles . . . . .	24
1.6.4	Sistemas multicapa reflectivos . . . . .	25
1.7	Tipología constructiva . . . . .	27
1.8	Ventajas y desafíos del aislamiento térmico . . . . .	28
1.9	Marco político . . . . .	30
1.10	Zonas climáticas en España . . . . .	34
1.11	Reacción al fuego . . . . .	37
1.12	Coste de materiales y mano de obra . . . . .	39
1.13	Protección y formato de instalación . . . . .	40
1.14	Ayudas y subvenciones . . . . .	41
<b>2</b>	<b>Sistemas de Climatización</b>	<b>43</b>
2.1	Introducción . . . . .	43
2.2	Tipos de sistemas de climatización . . . . .	44
2.2.1	Sistemas convencionales de climatización . . . . .	44

2.2.2	Sistemas de climatización por electricidad . . . . .	52
2.2.3	Sistemas de bomba de calor . . . . .	59
2.3	Comparativa final . . . . .	73
2.4	Marco político y subvenciones . . . . .	76
2.4.1	Marco político europeo . . . . .	77
2.4.2	Marco regulador en España . . . . .	78
2.4.3	Subvenciones y ayudas . . . . .	78
<b>3</b>	<b>Certificado de Eficiencia Energética (CEE)</b>	<b>81</b>
3.1	Introducción . . . . .	81
3.2	Marco normativo . . . . .	82
3.2.1	Real Decreto 235/2013 . . . . .	82
3.2.2	Real Decreto 390/2021 . . . . .	83
3.2.3	RITE . . . . .	84
3.2.4	Código Técnico de la Edificación (CTE) . . . . .	86
3.2.5	Limitación del consumo energético (HE0) . . . . .	89
3.2.6	Control de la demanda energética (HE1) . . . . .	91
3.2.7	Rendimiento de las instalaciones térmicas (HE2) . . . . .	96
3.2.8	Eficiencia energética de la iluminación (HE3) . . . . .	96
3.2.9	Contribución solar mínima de ACS (HE4) . . . . .	96
3.2.10	Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica (HE5) . . . . .	97
3.3	Metodología de cálculo y escalas de calificación . . . . .	98
3.3.1	Cálculo energético . . . . .	98
3.3.2	Cálculo de demanda energética . . . . .	100
3.3.3	Escala de calificación energética . . . . .	100
3.4	Herramientas de cálculo del certificado energético . . . . .	101
3.4.1	Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) . . . . .	102
3.4.2	Cypertherm HE Plus . . . . .	103
3.4.3	SG SAVE . . . . .	103
3.4.4	TeKton3D TK-CEEP . . . . .	104
3.4.5	CE3X . . . . .	104
3.4.6	CERMA . . . . .	105
3.5	Certificado energético . . . . .	106
3.5.1	Identificación del inmueble . . . . .	106
3.5.2	Descripción de la envolvente térmica . . . . .	107
3.5.3	Instalaciones térmicas . . . . .	108
3.5.4	Cálculo de consumo energético . . . . .	109
3.5.5	Etiqueta energética . . . . .	110
3.5.6	Medidas de mejora . . . . .	111
3.5.7	Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador . . . . .	112

<b>4</b>	<b>Estudio económico</b>	<b>115</b>
4.1	Aislamiento térmico . . . . .	115
4.1.1	Coste de materiales y mano de obra . . . . .	116
4.1.2	Protección y formato de instalación . . . . .	118
4.2	Sistemas de climatización . . . . .	119
<b>5</b>	<b>Conclusión</b>	<b>123</b>
 <b>Appendix</b>		<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)</b>	<b>127</b>
A.1	ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna . . . . .	127
A.2	ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles . . . . .	128
A.3	ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles	128
A.4	ODS 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos . . . . .	129
	 <b>Bibliografía</b>	<b>131</b>



# List of Figures

1.1	Esquema de los mecanismos de transferencia de calor en un cerámico. Fuente: Wikimedia Commons [216]. . . . .	4
1.2	Espuma de poliuretano proyectada en muro. Fuente: Poliuretano y Poliurea [187]. . . . .	7
1.3	Paneles de poliestireno expandido (EPS). Fuente: Placomat [185]. . . . .	8
1.4	Aplicación de poliestireno extrusionado (XPS) en suelo. Fuente: Construnario [88] . . . . .	8
1.5	Paneles de lana de roca aplicados sobre fachada. Fuente: Aislamiento Térmico [55]. . . . .	9
1.6	Lana de vidrio en cubierta inclinada. Fuente: Safe Energy [201]. . . . .	10
1.7	Insuflado de celulosa en cavidades. Fuente: Diseyco [96]. . . . .	12
1.8	Panel semirrígido de fibra natural (lana de oveja o cáñamo). Fuente: Impertechos [131]. . . . .	13
1.9	Paneles de corcho natural expandido. Fuente: Slow Studio [207]. . . . .	15
1.10	Manta de aislamiento térmico de denim reciclado. Fuente: Energía y Habitabilidad 3.0 [109]. . . . .	16
1.11	Capas de un sistema de aislamiento térmico exterior (SATE). Fuente: InfoConstrucción [132]. . . . .	17
1.12	Esquema de las capas de un sistema SATE. Fuente: Reformas Integrales 10 [195]. . . . .	17
1.13	Esquema de las capas de una fachada ventilada. Fuente: ATI Asesores [61]. . . . .	19
1.14	Ejemplo de aplicación de aislamiento térmico por insuflado en cerámico con cámara de aire. Fuente: Thermofloc España y Portugal [209]. . . . .	22
1.15	Ejemplo de aislamiento de techo con un sistema proyectado de espuma de poliuretano. Fuente: Ecogreenhome [104]. . . . .	24
1.16	Ejemplo de aislamiento por panel en fachada con sistema autoportante. Fuente: Aceroform [52]. . . . .	25
1.17	Ejemplo de aislamiento por sistema multicapa reflectivo en cubierta. Fuente: Antihumedades [59] . . . . .	26
1.18	Mapa de zonas climáticas de España. Fuente: Reto Kömmerling [196]. . . . .	36

1.19	Valores límite de transmitancia térmica. Fuente: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [30]. . . . .	36
3.1	Distribución climática de las capitales de provincia según la zonificación ZCE y ZCI. Fuente: Larrumbide & Bedoya, 2015 [163]. . . . .	87
3.2	Distribución de las zonas climáticas del CTE por provincias y municipios en España [53]. . . . .	88
3.3	Tabla de valores del coeficiente climático G según zona climática (ZCV/ZCI) en España [65]. . . . .	88
3.4	Valores base de consumo de energía primaria no renovable base (2013) [151]. . . . .	90
3.5	Valores límite de consumo de energía primaria no renovable (2022) [87]. . . . .	90
3.6	Valores límite de consumo de energía primaria total (2022) [87]. . . . .	91
3.7	Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en $W/m^2 \cdot K$ (DB-HE1) (2013). . . . .	92
3.8	Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en $W/m^2 \cdot K$ (DB-HE1) (2022). . . . .	92
3.9	Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en $W/m^2 \cdot K$ (DB-HE1) (2022). . . . .	93
3.10	Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en $W/m^2 \cdot K$ (DB-HE1) (2022). . . . .	93
3.11	Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en $W/m^2 \cdot K$ (DB-HE1) (2022). . . . .	94
3.12	Valores límite de transmitancia térmica y factor solar por zona climática. Fuente: Elaboración propia. . . . .	95
3.13	Ejemplo de certificado de eficiencia energética de vivienda unifamiliar [77]. . . . .	107
3.14	Ejemplo de Anexo I – Descripción de la envolvente térmica energéticas del edificio [77]. . . . .	108
3.15	Ejemplo de Anexo I – Descripción de las instalaciones térmicas energéticas del edificio. [77] . . . . .	109
3.16	Ejemplo de Anexo II – Descripción del calculo energético del edificio [77]. . . . .	110
3.17	Etiqueta oficial de calificación energética de edificios en España (Formato estándar RD 390/2021) [190]. . . . .	111
3.18	Ejemplo de Anexo III – Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética [77]. . . . .	112
3.19	Ejemplo de Anexo IV – Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico [77]. . . . .	113

# List of Tables

1.1	Comparativa técnica y de uso de materiales aislantes. Fuente: Elaboración propia. . . . .	27
1.2	Clasificación Euroclase y aplicación según tipo de aislamiento. Fuente: Elaboración propia. . . . .	38
1.3	Comparativa técnica y económica de sistemas de aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia. . . . .	40
1.4	Resumen de sistemas de protección complementarios para aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia. . . . .	40
2.1	Comparativa de eficiencia energética según el tipo de caldera. Fuente: [108], [177], . . . . .	45
2.2	Comparativa de modelos de calderas de condensación. Fuente: Elaboración propia . . . . .	46
2.3	Estimación del consumo anual de gas y su equivalencia energética. Fuente: TotalEnergies y Wolf Energy Guide [49, 41]. . . . .	47
2.4	Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con caldera de gas natural (tarifa TUR 2). Fuente: Elaboración propia . . . . .	48
2.5	Clasificación de tipos de calderas de gasóleo por eficiencia. Fuente: [106], [174] . . . . .	49
2.6	Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con caldera de gasóleo. Fuente: IDAE [127]. . . . .	49
2.7	Comparativa de modelos de calderas de gasóleo. Fuente: [97], [114], [103], [141], [113] . . . . .	50
2.8	Eficiencia de distintos tipos de calderas de biomasa. Fuente: [126], [198], [226], [200], [168] . . . . .	51
2.9	Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con caldera de biomasa. Fuente: Elaboración propia. . . . .	51
2.10	Comparativa técnica de radiadores eléctricos. Fuente: Elaboración propia . . . . .	53
2.11	Eficiencia y comportamiento térmico de los radiadores eléctricos. Fuente: Elaboración propia, Energy [63] . . . . .	54

2.12	Consumo y coste mensual estimados (5 h/día, 0,15 €/kWh). Fuente: Elaboración propia. . . . .	55
2.13	Consumo y coste mensual ajustados por tiempo de funcionamiento y eficiencia. Fuente: elaboración propia. . . . .	55
2.14	Ejemplos de radiadores eléctricos y coste de inversión para una vivienda de 90 m <sup>2</sup> . Fuente: Fichas técnicas [178, 95, 72, 221, 99]. . .	56
2.15	Comparativa de eficiencia energética entre tecnologías de suelo radiante. Fuente: Artículos [144, 172, 140, 199, 225, 215]. . . . .	57
2.16	Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con suelo radiante. Fuente: IDAE [144, 172] . . . . .	58
2.17	Comparativa de inversión de sistemas de suelo radiante. Fuente: Elaboración propia . . . . .	59
2.18	Variación del COP según la temperatura exterior. Fuentes: [205, 219]	61
2.19	Eficiencia de bomba de calor aire - aire según tipo de sistema y temperatura exterior. Fuentes: [139, 171] . . . . .	61
2.20	Consumo y coste mensual estimado para sistemas aire-aire a 5°C exterior. Fuente: Elaboración propia. . . . .	62
2.21	Consumo y coste mensual estimado para sistemas aire-aire a 15°C exterior. Fuente: Elaboración propia. . . . .	62
2.22	Consumo y coste mensual estimado para sistemas aire-aire a 25°C exterior. Fuente: Elaboración propia. . . . .	62
2.23	Coste operativo para sistema bomba de calor aire-aire. Fuente: Elaboración propia. . . . .	62
2.24	Comparación de COP entre bombas aire-agua y aire-aire sin refrigerantes especiales. Fuentes: ResearchGate [214], Energy and Buildings, Elsevier [179] . . . . .	64
2.25	COP en bombas de calor aire-agua. Fuentes: IJES [223], Sciencedirect [220], [206] . . . . .	65
2.26	Consumo y costes operativos de bomba de calor aire-agua. Fuentes: Gasfriocalor [116], Vaillant [213], LG España [143], Flexpro Industry [115] . . . . .	65
2.27	Coficiente de rendimiento (COP) según sistema de distribución y temperatura exterior. . . . .	68
2.28	Consumo eléctrico y coste operativo anual estimado por zona climática para una vivienda de 90 m <sup>2</sup> . Fuente de demandas térmicas: [60]. . .	68
2.29	Coficiente de rendimiento según tipo de captación geotérmica. Fuentes: Energy and Buildings [123], Smart Buildings [203], Energy and Buildings [92]. . . . .	70
2.30	COP promedio según profundidad de perforación geotérmica. Fuentes: Energy and Buildings [68] . . . . .	71

2.31	Rendimiento energético de la geotermia según clima. Fuente: Elaboración propia, [175]. . . . .	71
2.32	Coste del sistema de distribución en vivienda tipo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	73
2.33	Consumo y costes operativos anuales según sistema de distribución. Fuente: Elaboración propia. . . . .	73
2.34	Tabla comparativa de sistemas de climatización. Fuente: Elaboración propia. . . . .	74
2.35	Evaluación del confort térmico percibido por sistema de climatización (escala 1–5). . . . .	75
3.1	Valores límite del consumo total de energía primaria no renovable (EP <sub>nr</sub> ) por zona climática y clase energética [159]. . . . .	101
3.2	Comparativa entre herramientas oficiales para la certificación energética de edificios en España. Fuente: Elaboración propia . . . . .	106
4.1	Comparativa técnica y económica de sistemas de aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia. . . . .	117
4.2	Resumen de sistemas de protección complementarios para aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia. . . . .	118
4.3	Tabla comparativa de sistemas de climatización. Fuente: Elaboración propia. . . . .	120
4.4	Evaluación del confort térmico percibido por sistema de climatización (escala 1–5). . . . .	121



# List of equations

Ecuación		1:
	$R = \frac{e}{\lambda} \text{ [m}^2 \text{ K W}^{-1}\text{]}$	
.....		2
Ecuación		2:
	$U = \frac{1}{R_{\text{total}}} \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-1}\text{]}$	
.....		2
Ecuación		3:
	$E_{\text{final, PCS}} = \frac{Q_{\text{demanda útil (kWh)}}}{\eta_{s,PCS}} \text{ [kW h]}$	
.....		47
Ecuación		4:
	$V_{\text{gas}} (m^3) = \frac{E_{\text{final, PCS}}}{11,7 \text{ kWh/m}^3} \text{ [m}^3\text{]}$	
.....		47
Ecuación		5:
	$E_{\text{final}} = \frac{Q_{\text{demanda útil}}}{\text{COP}} \text{ [kW h]}$	
.....		58
Ecuación		6:
	$\text{Coste}_{\text{anual}} = E_{\text{final}} \times P_e \text{ [€]}$	
.....		58



# Chapter 1

## Aislamiento Térmico

El aislamiento térmico consiste en la instalación de materiales que minimizan la transferencia de calor entre el interior y exterior, creando una barrera para el flujo térmico de un edificio. Su objetivo principal es mantener una temperatura estable y confortable dentro del inmueble, y previene la aparición de condensación, humedad y moho. Una aplicación correcta del aislamiento térmico reduce la demanda energética tanto para el ciclo de calefacción como para el de refrigeración, que, a su vez, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

Aproximadamente el 60% de las viviendas en España se construyeron antes de que se publicase la primera normativa térmica incluida en el Real Decreto 2429/1979, denominada NBE-CT-79 Condiciones térmicas en los edificios la cual no se modificó hasta el 2006. Este factor demuestra que existe una gran deficiencia de aislamiento térmico en los edificios construidos previos a esta normativa [189, 191].

A la hora de realizar el estudio del aislante térmico se tienen en cuenta las siguientes propiedades técnicas:

- Conductividad térmica
- Resistencia térmica
- Transmitancia térmica
- Propiedades mecánicas
- Comportamiento químico
- Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua
- Calor específico
- Densidad

Además, se analiza el tiempo de vida del material, el coste de la instalación y sus propiedades ignífugas, entre otras. Todas estas propiedades se utilizan para determinar la mejor solución para cubrir las necesidades de cada vivienda, dependiendo de las características del edificio y su ubicación.

## 1.1 Conductividad térmica, resistencia y transmitancia

Los materiales de aislamiento térmico poseen propiedades físicas específicas capaces de limitar el flujo térmico.

- **Conductividad térmica** ( $\lambda$ ): Se refiere a la capacidad de conducir calor, es una propiedad física intrínseca de cada material que define la cantidad de calor que se transfiere en un segundo a través de  $1 \text{ m}^2$  de superficie con  $1 \text{ m}$  de espesor y una diferencia térmica entre sus caras de  $1 \text{ K}$ . Un buen aislante busca reducir este valor al mínimo posible, reduciendo así su capacidad de transmitir calor ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ).
- **Resistencia térmica** ( $R$ ): Capacidad de una capa de material de oponerse a la transferencia de calor con la fórmula del cociente del espesor del material ( $\text{m}$ ) y su conductividad térmica ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ).

**Ecuación 1.**

$$R = \frac{e}{\lambda} [\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}]$$

- **Transmitancia térmica** ( $U$ ): Define el flujo de calor que atraviesa un material respecto a la superficie que atraviesa y a su resistencia térmica total, incluyendo todo el espesor con distintos materiales y capas de aire. Con otras palabras, es el calor que atraviesa una superficie por cada grado de diferencia de temperatura entre sus extremos. Se calcula como el inverso de la resistencia total térmica del espesor completo:

**Ecuación 2.**

$$U = \frac{1}{R_{\text{total}}} [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$$

. Este parámetro incluye tanto la resistencia superficial interior, como la exterior, siendo también el parámetro de referencia usado en los requisitos normativos del CTE.

Estos valores tienen gran importancia para el aislamiento térmico porque determinan la eficiencia del material para bloquear el flujo térmico y minimizar al máximo las pérdidas de calor.

## 1.2 Tipos de transferencia térmica

Existen tres maneras de transferir el calor:

- **Conducción:** La transferencia de calor ocurre mediante un material sólido, por ejemplo, una pared o un panel. La mayoría de aislamientos se enfocan en prevenir este tipo de transferencia térmica con materiales compuestos por estructuras porosas o de celda cerrada.
- **Convección:** Ocurre con la transferencia de calor a través de fluidos como el aire o el agua, y suele darse en presencia de un sellamiento defectuoso, por ello, para prevenir estas pérdidas se enfoca en hermetizar el edificio mediante la instalación de barreras estancas y procurando conservar la continuidad de la envolvente térmica, evitando también la aparición de puentes térmicos.
- **Radiación:** La emisión de ondas electromagnéticas puede beneficiar o perjudicar según cómo se gestione. Por ello, la energía procedente del sol u otros dispositivos que generen calor residual debe ser, en la medida de lo posible, aprovechada o bloqueada mediante soluciones pasivas. Las mayores pérdidas por radiación se producen en climas cálidos y en fachadas orientadas al sur, donde la exposición solar es prolongada. Aun así, según Natural Resources Canada, la pérdida energética por radiación representa generalmente menos del 10 % del total, concentrándose principalmente en los huecos acristalados[173]. . Para minimizar este tipo de transferencia térmica, se recurre a materiales reflectantes o barreras radiantes que reducen el factor de absorción solar.

La mayor parte de las pérdidas provienen de la conducción, por lo tanto, se busca una baja conductividad térmica. Esto implica una alta resistencia térmica, resultando en una reducción de la transferencia de calor. La convección se debe controlar para evitar las corrientes internas de aire que reducen la efectividad del aislamiento térmico. La radiación tiene su mayor efecto en cerramientos con exposición prolongada al sol. Para ello, se instalan láminas reflectantes o acabados especiales sobre el material.

La finalidad de estas medidas es maximizar el rendimiento térmico para reducir la demanda energética global manteniendo el confort térmico. Aquella solución que ataque los tres tipos de transferencia térmica de manera eficiente conseguirá un comportamiento térmico óptimo.



Figure 1.1: Esquema de los mecanismos de transferencia de calor en un cerámico. Fuente: Wikimedia Commons [216].

### 1.3 Influencia en la eficiencia y el confort

La instalación de aislamiento térmico se basa en la incorporación de materiales que dificultan el flujo de calor por conducción, convección o radiación; por lo tanto, un edificio está mal aislado cuando gana energía térmica en exceso en verano y pierde en invierno. En búsqueda del confort térmico, este efecto provoca el uso extendido de sistemas de climatización que eleva la demanda energética y su gasto agregado.

Para evitar este efecto, se utilizan materiales que tengan una baja conductividad térmica, alta resistencia térmica, estructura porosa y baja densidad. Los materiales más utilizados son la lana de roca, espumas sintéticas o paneles aislantes en paredes, techos, suelos o ventanas. Los tipos de aislamiento más comunes son los siguientes:

- **Aislamiento de fibra de vidrio:** Fundiendo vidrio reciclado y arena, se transforma en filamentos que crean manta o paneles aislantes. Es uno de los materiales más comunes y económicos. Puede causar irritación de la piel y las vías respiratorias y debe de realizarse un sellado que asegure cualquier fuga de aire.
- **Aislamiento de espuma rígida:** Aislamiento hecho de espumas sintéticas como el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS) o el poliuretano (PUR). Se utiliza mayoritariamente en paredes exteriores, techos y suelos debido a que su aplicación resulta más sencilla en áreas de difícil acceso en comparación con las demás alternativas. Puede ser una alternativa más costosa y requiere una aplicación precisa, elevando el coste de instalación.
- **Aislamiento de lana de roca:** Fabricada a partir de roca volcánica fundida y transformada en fibras, se presenta en forma de mantas o paneles. Es

resistente al fuego, al agua y a la humedad, proporcionando aislamiento acústico y previniendo la aparición de moho. Esta opción es más costosa y puede crear irritación de la piel en su aplicación.

- **Aislamiento de celulosa:** Fabricada a partir de papel reciclado tratado con productos químicos ignífugos. Para su aplicación se realiza como material suelto colocado en cavidades, paredes y techos.

El aislamiento térmico eficiente contribuye a una reducción significativa del uso de sistemas de calefacción y refrigeración, ya que limita la cantidad de energía necesaria para mantener el confort térmico. Esto, a su vez, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> alineadas con los objetivos de descarbonización de la normativa europea y española.

Además, en muchos países, las normativas de construcción obligan a incorporar un aislamiento mínimo en las edificaciones nuevas o reformadas para cumplir con los estándares de eficiencia energética. Una rehabilitación térmica adaptada correctamente a las necesidades de la vivienda puede reducir la demanda energética de calefacción y refrigeración entre un 30 % y 60 %, según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [130]. Particularmente, el aislamiento colocado en el exterior (SATE) puede alcanzar hasta un 60 % de ahorro energético, ya que representa un aislamiento continuo en la envolvente del edificio [197].

Además de reducir la demanda energética, también se centra en reducir la aparición de puentes térmicos. Estas son zonas de la envolvente del edificio donde se ubica una mayor transferencia de calor. Trabajar en la mejora de estas zonas puede reducir de manera significativa las pérdidas globales de la vivienda y eliminar las zonas más propensas a condensación y humedad.

Como se ha mencionado anteriormente, la mejora del confort térmico es la finalidad principal del estudio de aislamiento térmico. Esto se consigue estabilizando la temperatura interior y sus propiedades; un reto aún más complicado en climas con temperaturas extremas.

Por último, la consecuencia de la mejora del aislamiento térmico reside en la mejora del Certificado de Eficiencia Energética (CEE), aunque este documento deberá servir como referencia para comprobar la efectividad de las medidas aplicadas y como herramienta para conseguir las subvenciones ofrecidas para promover la mejora del aislamiento térmico.

## 1.4 Tipología de materiales aislantes

Para definir la tipología de materiales, estos se pueden clasificar según su origen (mineral, orgánico o sintético), también se pueden diferenciar según la estructura interna (celular abierta, cerrada, fibrosa o multicapa). Por último, sus propiedades

mecánicas, térmicas y ambientales también definen el tipo de material con el que se está tratando. Según los requisitos de la vivienda, se necesitarán unos requisitos térmicos y acústicos que definirán el tipo de intervención que necesita la vivienda, ya sea obra nueva o rehabilitación.

### 1.4.1 Materiales sintéticos (petroquímicos)

Denominados petroquímicos por su derivación del petróleo. Poseen un comportamiento térmico sobresaliente gracias a su estructura de celda cerrada que posee la propiedad de retener el aire, aunque hay que considerar el impacto medioambiental elevado y las bajas propiedades acústicas que ofrecen.

#### Espuma de Poliuretano (PUR)[33]

- Conductividad térmica ( $\lambda$ ): 0,019 a 0,040 W/m·K.
- Densidades: Flexible de baja densidad para embalajes y cojines (10–25 kg/m<sup>3</sup>), flexible de densidad media común en colchones y asientos: (30–50 kg/m<sup>3</sup>), rígida de densidad media para aislamiento térmico en construcción y refrigeración (30–60 kg/m<sup>3</sup>), rígida de alta densidad para aplicaciones estructurales y de alta resistencia (300 kg/m<sup>3</sup>).
- Aplicaciones: Cubiertas industriales y residenciales, cámaras frigoríficas, SATE, cerramientos exteriores, paredes interiores, fachadas ventiladas, rehabilitación de fachadas, suelos y techos.

Descripción: Este material es una espuma ligera, habitualmente con celdas cerradas. Las celdas son las burbujas que se forman al aplicar el material que encierran el gas y se separan por finas paredes de polímero, si estas capas se expanden sin fisuras es de celda cerrada y el gas queda encerrado en su interior limitando la conductividad térmica y la absorción de agua, al contrario si son de celda abierta el gas entra en contacto con el exterior y se convierte en un material transpirable con mayor conductividad térmica y mejor aislamiento acústico. Se aplica en forma de aerosol o paneles y su gran capacidad aislante y baja absorción de agua la hacen ideal para sellar huecos y espacios difíciles de alcanzar. El PUR rígido posee una estructura química similar al PUR de celda abierta (poliuretano flexible) pero presenta una conductividad térmica y absorción de agua menor y una mejora en el comportamiento contra el fuego. También tiene una gran resistencia a la compresión, aplicable para aplicaciones que superen los 200 KPa, especialmente en casos de cubiertas y suelos. Ofrece una baja permeabilidad (factor de resistencia 60 - 150) y una alta resistencia a la difusión del vapor.

- **Ventajas:** Excelente adherencia a diversas superficies y se expande al aplicarse, asegurando una cobertura uniforme, continua y sin juntas, ofreciendo el aislamiento térmico más alto por centímetro, impermeable y resistente al fuego.
- **Desventajas:** Baja transpirabilidad y supone un riesgo ambiental por CFC y HCFC con un reciclaje complejo por la estructura del PUR, una sensibilidad a la aplicación suponiendo riesgos al rendimiento del aislamiento por una aplicación desnivelada y el coste inicial más elevado frente a otras alternativas.

**Recomendación de uso:** Ideal para rellenar espacios complejos y zonas donde se requiere un sellado eficaz, como huecos en carpintería y cerramientos.



Figure 1.2: Espuma de poliuretano proyectada en muro. Fuente: Poliuretano y Poliurea [187].

### **Poliestireno Expandido (EPS)[22]**

- Conductividad térmica ( $\lambda$ ): 0,029 a 0,046/0,053 W/m·K.
- Densidad: 10–30 kg/m<sup>3</sup>.
- Aplicaciones: SATE, cerramientos exteriores, rehabilitación de fachadas.

**Descripción:** Conocido como corcho blanco, es un material ligero y económico. Su estructura de poro abierto le permite ser más absorbente de humedad, lo que puede reducir sus propiedades aislantes. Tiene baja resistencia mecánica.

- **Ventajas:** Fácil de manejar y manipular, con buena capacidad aislante (alto rendimiento térmico) y económico.
- **Desventajas:** Mal comportamiento frente al fuego (Euroclase E) y mal comportamiento acústico con posibles impactos medioambientales negativos.

**Recomendación de uso:** Perfecto para proyectos con un presupuesto ajustado y en aplicaciones donde el agua no sea un problema, como fachadas y forjados.



Figure 1.3: Paneles de poliestireno expandido (EPS). Fuente: Placomat [185].

### **Poliestireno Extrusionado (XPS)[36]**

- Conductividad térmica ( $\lambda$ ): 0,025 a 0,040 W/m·K.
- Densidad: 30–45 kg/m<sup>3</sup>.
- Aplicaciones: Suelos, cubiertas invertidas y zonas húmedas.

**Descripción:** A diferencia del EPS, el XPS tiene una estructura de poro cerrado que lo hace menos absorbente y más resistente a la humedad. Es denso y se utiliza comúnmente en aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica.

- **Ventajas:** Alta resistencia mecánica, ideal para estructuras que soportan cargas, como cubiertas y muros enterrados, gracias a su alta resistencia a la compresión, incorporando una absorción de agua casi nula.
- **Desventajas:** Baja transpirabilidad, menos económico que el EPS.

**Recomendación de uso:** Utilizar en techos y estructuras que soporten cargas, especialmente en cubiertas de tejas o en áreas donde la humedad es un factor crítico.

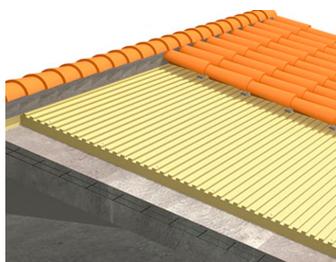


Figure 1.4: Aplicación de poliestireno extrusionado (XPS) en suelo. Fuente: Construnario [88]

## 1.4.2 Aislamiento mineral

El aislamiento mineral incluye materiales fibrosos generados a partir de minerales fundidos como el basalto (lana de roca) o la arena y vidrio reciclado (lana de vidrio). El procesado forma fibras con estos materiales que se entrelazan, obteniendo una estructura porosa que aísla el aire.

### Lana de Roca[40]

- Conductividad térmica( $\lambda$ ): 0,030 a 0,050 W/m·K.
- Densidad: 30–200 kg/m<sup>3</sup>.

Descripción: Este material, compuesto de roca volcánica (basalto o dolomita), producido a partir de la fusión a 1600 °C de la roca, incluyendo hasta un 70 % de materiales reciclados para crear fibras, es conocido por ser incombustible, clasificado como A1 en la normativa europea, soportando altas temperaturas sin degradarse y ofreciendo excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico por ofrecer una mayor densidad, aunque eso complica su manipulación por su rigidez, necesitando herramientas específicas y elevando el coste.

- Ventajas: Resistente al fuego, hidrofóbica e imputrescible, lo que la convierte en una opción ideal para áreas donde la seguridad contra incendios es crítica.

**Recomendación de uso:** Útil en techos falsos, suelos y paredes exteriores, especialmente en edificios que requieren protección contra el fuego.



Figure 1.5: Paneles de lana de roca aplicados sobre fachada. Fuente: Aislamiento Térmico [55].

### Lana de Vidrio[45]

- Conductividad térmica ( $\lambda$ ): 0,030 a 0,046 W/m·K.
- Densidad: 10–80 kg/m<sup>3</sup>.

Descripción: Este material mineral e inorgánico está hecho de filamentos de vidrio creados por fusión a 1450 °C y es resistente a la humedad, además de incorporar las mismas propiedades ignífugas de la lana de roca. Se utiliza comúnmente en sistemas de climatización.

- **Ventajas:** Su naturaleza ignífuga y su resistencia a la humedad (si está tratada) y acústica lo hacen adecuado para diversas aplicaciones gracias a su estructura fibrosa formada por hasta un 80 % de materiales reciclados y su característica hidrofóbica que repele el agua y protege la absorción del agua por la lana. Es fácil de instalar con un buen equipo de protección y ofrece una larga durabilidad con resistencia a condiciones ambientales adversas, aunque al estar generado de materiales reciclados con bajo impacto ambiental durante su vida útil, se considera sostenible y es una alternativa más económica.
- La generación de polvo y fibras que irritan las vías respiratorias durante su colocación hacen que requiera un equipo de protección personal. Según las características se requieren distintos espesores respecto a otros materiales. Por último, como se ha mencionado antes, la lana de roca si está correctamente tratada no absorbe el agua, por ello es importante asegurar una adecuada aplicación para asegurar la resistencia al agua y a la humedad.

**Recomendación de uso:** Muros y tabiques interiores, fachadas ventiladas, cubiertas y tejados, suelos flotantes e instalaciones industriales.



Figure 1.6: Lana de vidrio en cubierta inclinada. Fuente: Safe Energy [201].

### 1.4.3 Aislamiento ecológico

El aislamiento ecológico se produce a partir de materiales aislantes que provienen de recursos naturales (vegetal o animal), de recursos reciclados o con un bajo o nulo impacto ambiental. Las propiedades térmicas y acústicas que ofrecen este tipo

de aislantes en comparación con los aislantes tradicionales se vuelven muy competitivos cuando se consideran factores de sostenibilidad y salud. Son una opción que ofrece menores requisitos de energía para la fabricación y son biodegradables al final de la vida útil.

La permeabilidad es otro tema que destaca del aislamiento ecológico ya que ofrece cierta permeabilidad al agua pudiendo regular la humedad interior aportando un ambiente más saludable sin incluir partículas de sustancias tóxicas. La característica de higroscópico que aporta esa permeabilidad también limita las aplicaciones con riesgo al fuego ya que son materiales combustibles en caso de no poseer tratamientos ignífugos (clase Euroclase E), la mayoría de estos materiales requieren dicho tratamiento para cumplir con la regulación actual sobre la seguridad contra incendios. A pesar de esta limitación, se encuentran más proyectos con este aislamiento por sus ventajas de sostenibilidad, salud y confort interior.

### Celulosa[28]

- Conductividad térmica: 0,038–0,044 W/m·K
- Densidad: 30–70 kg/m<sup>3</sup>
- Transpirabilidad: factor  $\mu = 1-2$  (muy permeable)
- Comportamiento al fuego: Euroclase E (combustible que forma carbonilla al arder)

Fabricada a partir hasta un 85–90 % de papel reciclado, por lo tanto, la mayor parte de su carbono es biogénico ya que se contrarresta con el carbono que consumió la planta con la que se creó el papel. A menudo tratada con sales de borato para prevenir incendios y plagas. Es una opción ecológica con buena eficiencia térmica, comercializada en forma de guata suelta usada para insuflar en cavidades de muros o falso techo; también se presenta en mantas o paneles semirrígidos prensados. Como competencia paralela se encuentra la lana mineral, aunque su factor de resistencia al vapor bajo hace que la celulosa sea interesante por su transpirabilidad. Aunque está tratada con sales de boro para no avivar el fuego, no se recomienda para aplicaciones con exposición a temperaturas altas, ya que se forma una capa protectora carbonizada que, una vez consumida, puede llegar a combustionar completamente.

- Ventajas: Puede ser insuflada en espacios difíciles de alcanzar, lo que permite una cobertura uniforme. Es un material reciclado y ecológico que aprovecha los residuos de papel reduciendo el nivel de desechos con una fabricación que demanda poca energía y genera pocas emisiones. Alternativa ligera y flexible

con una instalación por paneles o insuflado ideal para superficies irregulares capaz de atacar los puentes térmicos controlando el nivel de humedad con una vida útil duradera y un final del ciclo de vida biodegradable sin residuos tóxicos.

- Desventajas: Sus capacidades de transpirar pueden ser un inconveniente si se moja el material ya que pierde sus propiedades, por lo tanto, se descarta el uso en fachadas y cubiertas expuestas a filtraciones de agua. Para apoyar esta precaución existe una prohibición del uso de materiales hidrófilos en cámaras de fachada ventilada (CTE DB HS 1[31]). Para utilizarse se requiere una impermeabilización de la hoja exterior con un tratamiento hidrófugo. En el caso de la instalación insuflada sufre el riesgo de caer por su propio peso dejando descubiertas las partes superiores (control de densidad durante la aplicación), además de desprender polvo que puede llegar a causar irritación de las vías respiratorias sin el uso de mascarillas.

**Recomendación de uso:** Excelente opción para proyectos sostenibles, especialmente en paredes y áticos, buhardillas o techos planos no transitables. Aislamiento de cerramiento por insuflado en cámaras de aire de muros y cubiertas inclinadas entre rastreles sobre falso techos.



Figure 1.7: Insuflado de celulosa en cavidades. Fuente: Diseyco [96].

### Fibras Naturales (algodón, paja, cáñamo, lana de oveja)[43]

- Conductividad térmica: 0,034–0,042 W/m·K
- Densidad: 20–45 kg/m<sup>3</sup>
- Transpirabilidad: factor  $\mu = 1-2$
- Comportamiento al fuego: Euroclase E/F (mejora a C/B con aditivos)

Utilizan materiales vegetales y animales con propiedades térmicas moderadas, transpirabilidad alta y baja conductividad térmica. Ejemplos: lana de oveja (queratina, inercia al fuego), cáñamo (fibra celulósica, arcilla), algodón reciclado (combustible sin aditivos). A menudo requieren tratamientos ignífugos o antimicrobianos. Materiales respetuosos con el medio ambiente que requieren tratamiento

para mejorar su resistencia al fuego y al moho, ejemplos de estos materiales son la lana de oveja, un material tradicional, subproducto de la ganadería ovina, compuesta principalmente por queratina que ofrece características específicas como la resistencia y la inercia al fuego. Después de limpiar la lana e higienizarla se puede mezclar con materiales sintéticos como el poliéster para crear paneles semirrígidos o mantas. La característica que resalta es su capacidad higroscópica que mantiene todas las propiedades aislantes iniciales con una absorción límite del 30 - 45 % de su peso en agua. Al absorber la humedad del aire, se genera calor por una reacción exotérmica que combate humedades y regula la humedad ambiental. Se considera combustible sin tratamiento (Euroclase E o F), pudiendo llegar a Euroclase C o B-s2 d0 con ciertos tratamientos ignífugos.

- **Ventajas:** Sostenibles y renovables, ideales para proyectos de vivienda ecológica con un comportamiento a la humedad muy favorable absorbiendo la humedad y regulando la calidad del aire. Buenos comportamientos térmicos en verano, gracias a la inercia térmica que ofrecen, el calor se retrasa en la penetración a la vivienda, esto mantiene la frescura por tiempos más prolongados.
- **Desventajas:** Es necesaria la aplicación de tratamientos químicos para evitar riesgos con el fuego, se tiene que tomar en consideración que el material se puede comprimir con el paso del tiempo, además del coste moderado ya que materiales industriales se pueden producir de manera más económica.

**Recomendación de uso:** Usar en paredes y techos, siempre que se hayan tratado adecuadamente para aumentar su durabilidad e inmunidad ignífuga. Se produce en forma de mantos y rollos que se colocan sobre las cubiertas inclinadas y forjados.

El cáñamo es una planta que posee fibras utilizadas en cordelería, tejidos y papel pero también posee una fibra en los tallos del cáñamo que es rica en celulosa y sirve como aislante en formato de rollos flexibles, paneles semirrígidos (estos incorporan entre un 10-25 % de fibra unión para añadir estabilidad) y material suelto a granel. En cuanto a durabilidad, resistencia al fuego, comportamiento frente a la humedad es muy similar al resto de fibras naturales con el detalle de que existe un tratamiento de cáñamo con arcilla.



Figure 1.8: Panel semirrígido de fibra natural (lana de oveja o cáñamo). Fuente: Impertechos [131].

## Corcho[47]

- Conductividad térmica: 0,038–0,042 W/m·K
- Densidad: 100–120 kg/m<sup>3</sup>
- Transpirabilidad: factor  $\mu = 7\text{--}14$  (moderadamente permeable dependiendo de la densidad)
- Comportamiento al fuego: Euroclase E  $\rightarrow$  B (sin tratamiento es combustible aunque no emite gases tóxicos)

Material natural, sostenible y ecológico que ofrece baja conductividad térmica. Sin embargo, suele ser más costoso que otros aislantes ya que es de origen vegetal de la corteza del alcornoque, típico del clima mediterráneo. Su corteza se regenera cada 9 - 12 años, por lo tanto, se considera de extracción sostenible. El corcho se somete a un proceso de expansión por calor donde los granos de corcho se someten a un calentamiento en autoclave, expandiendo sus celdillas que se aglomeran y forman bloques o planchas rígidas.

- Ventajas: Imputrescible y duradero, natural y renovable, lo que lo hace una opción sólida para diversas aplicaciones con buenos niveles de aislamiento térmico y acústico por su estructura celular cerrada llena de aire que absorbe determinadas frecuencias molestas para el oído humano. Mantiene sus propiedades de durabilidad ofreciendo habitualmente una garantía de por vida más extensa que el propio edificio con soportes de temperatura entre -180 °C a 120 °C.
- Desventajas: Opción menos económica a pesar de los factores de sostenibilidad y durabilidad. La oferta de producto queda muy definida por el desarrollo de la industria en la localidad ya que existen pocas fábricas locales de producción de corcho expandido y queda limitada por las restricciones de diseño contra incendios, por las limitaciones mecánicas que tenga que soportar y por el espesor mínimo establecido por la regulación.

**Recomendación de uso:** Ideal para fachadas y suelos donde se busque un material natural, hecho para aislamientos en el exterior, en fachadas ventiladas o revestidas por paneles fijos y mortero que ofrecen un aislamiento más continuo. En cubiertas inclinadas, suelos y forjados es aplicable con las medidas pertinentes. Para aislamiento interior se comienza a observar en rehabilitación para evitar zonas de condensación o puentes térmicos que además puedan reducir efectos acústicos.



Figure 1.9: Paneles de corcho natural expandido. Fuente: Slow Studio [207].

### Denim Reciclado[48]

- Conductividad térmica: 0,037–0,044 W/m·K
- Densidad: 30–70 kg/m<sup>3</sup>
- Transpirabilidad: factor  $\mu = 1-2$  (muy permeable)
- Comportamiento al fuego: Euroclase E (combustible, forma carbonilla al arder)

Fabricado a partir de jeans (vaqueros) o prendas de algodón recicladas, es una opción ecológica con buenas propiedades aislantes, forma parte de los materiales ecológicos por extender la vida de textiles desechados. Además, no contiene ningún tipo de fibras tóxicas o que produzcan irritación, permitiendo una manipulación segura.

- Ventajas: Es un material natural y sostenible, sin riesgos tóxicos, con buenas propiedades acústicas y existe en formato de mantas que facilitan aún más su manipulación.
- Desventajas: Mayor coste en comparación con aislantes convencionales y requiere tratamientos adicionales ignífugos para ser resistente al fuego. Por último, al ser un material reciclado depende del suministro de materiales disponibles, el cual es limitado en algunos mercados.

**Recomendación de uso:** Una buena alternativa para soluciones sostenibles en paredes interiores, áticos y techos. Especial para aquellos clientes que busquen alejarse de componentes químicos agresivos.



Figure 1.10: Manta de aislamiento térmico de denim reciclado. Fuente: Energía y Habitabilidad 3.0 [109].

## 1.5 Tipología de aplicación del aislamiento térmico

El rendimiento del aislamiento térmico depende de varios factores como el tipo de material o la distribución del aislante, pero también depende del método de aplicación que define la capacidad de adaptarse a diferentes proyectos con unas condiciones climáticas, estructurales y normativas específicas.

A continuación, se ofrece una clasificación de los tipos de aplicación de aislamiento térmico ordenados según tres criterios distintos que aportan distintos enfoques y soluciones válidas para realizar una toma de decisiones fundamentada.

### 1.5.1 Aislamiento exterior

#### Sistema SATE

El sistema de aislamiento térmico exterior ofrece una solución constructiva capaz de eliminar gran parte de las pérdidas energéticas aplicables a proyectos de obra nueva y rehabilitación sin reducir el espacio habitable interior. Su aplicación consiste en la colocación de paneles aislantes rígidos sobre la fachada exterior con una capa superficial de refuerzo formada de un mortero base con una malla de fibra de vidrio y otra capa de acabado con un revoco decorativo que protege la instalación.

Como resultado se obtiene un revestimiento continuo por la cara externa del edificio, que protege de los efectos de la intemperie y elimina los puentes térmicos estructurales críticos (pilares, esquinas, uniones), responsables de gran parte de las pérdidas energéticas. Se ha registrado una mejora de entre 2 y 4°C en la temperatura superficial interior tras su instalación, además de una mejora significativa en los puntos vulnerables sin comprometer la estructura portante, declarándose una estrategia clave contra la pobreza energética [51, 26].



1. Adhesivo
2. Panel aislante
3. Fijación mecánica, espiga de fijación
4. Capa base (1.ª)
5. Malla de refuerzo
6. Capa base (2.ª)
7. Acabado final

Figure 1.11: Capas de un sistema de aislamiento térmico exterior (SATE). Fuente: InfoConstrucción [132].

Según ANFAPA y fuentes sectoriales, el sistema se compone de adhesivo, aislamiento, fijaciones mecánicas, capa base con malla de refuerzo y capa de acabado [44, 11], para este tipo de aplicación se utilizan materiales como el poliestireno expandido (EPS), aunque también aparecen opciones más eficientes como el poliestireno extruido (XPS) o algún material de fibra natural como lanas minerales. La selección del material se realizará según las características que se han estudiado previamente: comportamiento al fuego, permeabilidad, resistencia térmica. Aunque siempre se hable de buscar la opción más eficiente, el inicio del proyecto pasa por cumplir las exigencias del Código Técnico de Edificación (CTE).

Cabe mencionar que la instalación de este sistema requiere mano de obra especializada y un proceso controlado y seguro, incluyendo la correcta preparación del soporte y el uso de material homologado, ya que, las consecuencias de una mala aplicación pueden ocasionar desprendimientos o filtraciones. Además, el coste inicial de la instalación es mayor porque implica modificar toda la fachada exterior (Problema para fachadas protegidas o comunidades por necesitar permisos especiales) pudiendo necesitar andamios y una mayor cantidad de material que si se realizara el aislamiento interior, el precio oscila entre 60 y 150€/m<sup>2</sup>.

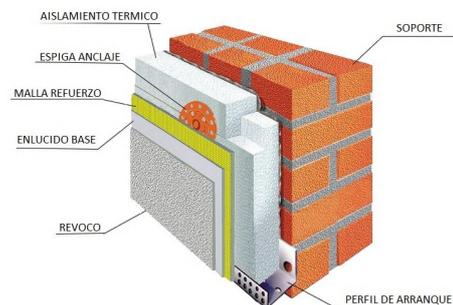


Figure 1.12: Esquema de las capas de un sistema SATE. Fuente: Reformas Integrales 10 [195].

## Fachada ventilada

La fachada ventilada está formada de una cámara de aire ventilada, ubicada entre el revestimiento y el aislante que crea un efecto chimenea circulando el aire aprovechando la convección desde el inferior al superior de la fachada, la circulación del aire consigue eliminar el calor y la humedad y evita que entre a la vivienda. En verano, la cámara de aire se calienta por radiación solar y el aire sube expulsando el calor, en invierno, expulsa el vapor de agua que surge del interior y mantiene el material aislante y el muro de soporte seco. La fachada ventilada incluye en la cámara de aire la reducción de transmisión energética por convección y radiación siendo una de las soluciones más eficientes en aislamiento acústico y térmico.[6, 10].

Se utilizan materiales similares a los del sistema SATE como el EPS y XPS pero destaca la lana mineral en forma de paneles rígidos por su transpirabilidad, permitiendo el paso del vapor de agua hacia la cámara, reduciendo el efecto de condensación, además tiene buenas propiedades de aislamiento acústico y comportamiento al fuego. El panel rígido se coloca entre los perfiles verticales de la estructura metálica que incluye toda la instalación o fijado al muro con espigas o anclajes metálicos, por el otro lado, el revestimiento exterior tiene la función de protección y estética con materiales como placas cerámicas, piedras naturales, paneles metálicos (aluminio o acero), paneles de fibrocemento, etc. Este incluye un velo negro de fibra de vidrio que protege el aislamiento a través de sus juntas.

La mayor ventaja que incorpora este aislamiento es el comportamiento frente a la humedad, gracias al revestimiento exterior, se protege de cualquier efecto de la intemperie y la cámara de aire mantiene una ventilación continua que seca el cerramiento aumentando su vida útil, también tiene un buen comportamiento en verano, muy buen aislamiento acústico por sus capas de revestimiento, cámara de aire y absorbente, la durabilidad del proyecto es de largo plazo y el mantenimiento proporciona un cambio sencillo de placa en caso de que se dañen.

Al contrario, el coste inicial de un proyecto de fachada ventilada supera al SATE pudiendo llegar a duplicar su precio, requiere una subestructura metálica, paneles de alta calidad y mano de obra especializada que preste especial cuidado en la aparición de puentes térmicos en los anclajes y la correcta instalación de soportes que aguantan las cargas de viento necesarias. El grosor del aislamiento también incrementa con respecto al SATE pudiendo dificultar las alineaciones y encuentros de la fachada o encontrar limitaciones de espacio.

Por último, en el caso de edificios altos, es necesario instalar una protección contra la propagación de incendios con barreras cortafuegos ya que el efecto chimenea mencionado anteriormente también puede ayudar a propagar el fuego.



Figure 1.13: Esquema de las capas de una fachada ventilada. Fuente: ATI Asesores [61].

### 1.5.2 Aislamiento interior

En este caso, el aislamiento se introduce en la cara interior del cerramiento, especialmente útil para proyectos con estructuras protegidas, con restricciones de andamios o límite de presupuesto. Habitualmente incluye un trasdosado, otra hoja interior o falso muro que crea una cámara para introducir el aislante. Como resultado se obtiene un sistema de trasdosados que incorporan un revestimiento interior formado de una capa de yeso o madera con una capa de aislante adosada al muro. Aplicar el aislamiento permite aumentar la eficiencia energética de la vivienda sin modificar la fachada, y se aplica tanto a obra nueva como en rehabilitación. Aunque representa una solución local comparado con el sistema SATE, su aplicación es rápida y sencilla sin necesitar permisos para andamiaje.

Existen distintos tipos de formato:

- **Trasdoso directo:** paneles prefabricados de yeso que incorporan el aislante en su interior.
- **Trasdoso semidirecto:** las placas se colocan en la pared con perfiles.
- **Trasdoso autoportante:** formado por una estructura metálica que soporta las placas del muro, separada de éste para introducir el aislante, siendo esta la opción más robusta y capaz de admitir el máximo espesor de aislante.

Los materiales más comunes son la lana mineral, donde los paneles de aislante se introducen en los montantes de perfiles metálicos del trasdosado autoportante. También se utilizan paneles de EPS o XPS, útiles para una instalación más sencilla con trasdosados directos compuestos de placas de yeso con el material aislante.

Cabe destacar que el aislamiento interior desplaza entre 5 y 10 cm las paredes al interior, perdiendo espacio habitable significativo para ciertos proyectos. No es capaz de eliminar los puentes térmicos estructurales ya que estos se encuentran alrededor de componentes como forjados, pilares o tabiques. Esto crea una

falta de aislamiento en uniones entre suelo y fachada, donde pueden producirse grandes pérdidas energéticas. Tampoco combate el efecto de condensación, ya que el muro original permanece en la parte fría del cerramiento y pierde transpirabilidad. Para evitarlo, se colocan barreras de vapor, aunque el muro sigue expuesto a la intemperie, lo que acorta la vida útil de los materiales y la estructura.

### **1.5.3 Aislamiento en cubierta**

La cubierta es la parte del edificio más vulnerable a pérdidas energéticas, principalmente por efectos de convección. Por ello, es importante asegurar un buen aislamiento en cubierta.

#### **Cubierta plana convencional**

Como la cubierta tendrá la mayor carga de humedad, el aislante térmico se coloca por debajo de la capa impermeabilizante y la capa de protección, por encima del soporte estructural. Esta distribución deja expuesta la lámina impermeabilizante a los efectos de la intemperie, siendo el peor efecto el de grandes oscilaciones de la temperatura y el efecto del sol que dilata, contrae y deteriora el material reduciendo su vida útil. En el caso de ser transitable la cubierta, se instala una capa superficial extra para su uso, mientras que si no es transitable.

#### **Cubierta plana invertida**

A diferencia de la cubierta convencional, en este caso, el orden de las capas se invierte ubicando el aislante por encima de la capa impermeabilizante, esta distribución permite eliminar la condensación que pudiese aparecer en la cara fría de la capa impermeabilizante, un hecho que no hubiese sido posible sin la ayuda del aislante XPS que mantiene sus propiedades como aislante independientemente de la humedad del entorno, por ello, en esta aplicación se requieren materiales con baja absorción de agua. En este caso, el aislante se encuentra protegido por una capa pesada de terreno (grava, tierra, baldosas...) consiguiendo un sistema con estabilidad en la temperatura y protegida de los efectos de los rayos UV.

#### **Cubierta inclinada**

La cubierta inclinada puede posicionarse a nivel de plano inclinado, debajo del tejado a ras de la pendiente, o a nivel del forjado superior horizontal, ubicado sobre el techo de la planta inferior sin incluir el ático, para decidir su colocación se observa la buhardilla (espacio debajo de la cubierta) y sus necesidades constructivas, por ejemplo, si es una zona habitable, se aplica a nivel del plano inclinado. La cubierta inclinada puede ser ventilada, obteniendo un mejor comportamiento al calor y la

humedad, añade una separación entre el aislamiento y la capa exterior de protección, otro método sería ubicando en la parte superior una cubierta no habitable, donde el aislante, en este caso, se coloca sobre la cubierta. La ventilación crea un efecto de regulador higrométrico y una barrera para el calor en verano, mientras que en invierno expulsa el calor acumulado.

### 1.5.4 Aislamiento en suelos

El aislamiento en suelos es especialmente especial para edificios sobre solera en contacto con el suelo, con forjado sanitario que tienen aire entre el suelo y el terreno y plantas bajas con espacios no climatizados debajo. El calor es la mayor pérdida que ocurre en invierno a través del suelo y genera la sensación de frío en los pies que reduce significativamente el confort de una vivienda.

El **forjado sanitario** está compuesto de una separación entre el suelo de la planta baja o el primer forjado del edificio y el terreno, con un sistema constructivo formado por un sistema de encofrados perdidos elevando una losa de hormigón alrededor de 50 cm creando un hueco que permite la circulación de aire ventilado.

El aislamiento puede colocarse:

- **Debajo del forjado:** requiere acceso al espacio bajo forjado, pero permite continuidad sin interrupciones.
- **Encima del forjado:** más accesible en obra nueva o rehabilitación.

También debe generarse un **cordón perimetral** alrededor de los muros para evitar puentes térmicos. Se recomiendan materiales como **XPS o EPS de alta densidad**, que tienen buena resistencia térmica y baja absorción de agua. Un buen forjado sanitario reduce la humedad y las corrientes de aire frío desde el terreno, manteniendo la temperatura interior estable y el confort térmico elevado.

## 1.6 Técnicas de aplicación

### 1.6.1 Inyección o insuflado

Insuflado se refiere al proceso de introducir el material aislante a granel (copos, fibras o gránulos) en las cavidades de techos, muros, suelos y otros cerramientos, evitando una obra mayor por inyección neumática realizando agujeros para soplar el material aislante.

Los materiales más utilizados son fibras de lana mineral, fibra de vidrio, celulosa reciclada y poliestireno expandido (EPS). Es clave inyectar el material a presión para rellenar los huecos y eliminar las bolsas de aire que amenazan con aumentar las

pérdidas energéticas. Cuanto más continua y uniforme sea la barrera térmica mejor comportamiento se obtendrá frente a las pérdidas, bloqueando las corrientes de convección que aparecen en las cámaras de aire y eliminando los puentes térmicos con una reducción de la demanda energética por climatización entre un 10% y 30%[9, 27, 15].

Esta aplicación es muy útil en edificios que necesitan una rehabilitación sencilla y disponen de cámaras de aire vacías en sus cerramientos porque su intervención es poco invasiva ya que no se altera la estética superficial del edificio y tampoco reduce el espacio útil en la vivienda, su simpleza también aporta rapidez ya que insuflar una vivienda media de 90 m<sup>2</sup> tarda aproximadamente 1–2 días y se adapta a cualquier tipo de irregularidades que ofrezca la cámara de aire. También se mejora el comportamiento acústico y gracias a la mejora en comportamiento se aumenta la eficiencia energética, baja la demanda energética y se contribuye con los objetivos de sostenibilidad bajo la calificación energética.

Como desventajas se debe mencionar que para insuflar el material aislante se requiere accesibilidad a la cámara de aire y debe cumplir requisitos de continuidad y obstrucción por materiales de obra, cumplir con los requisitos de espesor del Código Técnico de la Edificación (CTE), además, a pesar de lograr una gran uniformidad de la distribución del material a lo largo de la cámara de aire, queda limitado al espacio que ocupe esta, cualquier elemento constructivo (pilares, cajas de persiana, encuentros) representará un puente térmico. Por último, cabe destacar que una vez aplicado el material y sellado, se dificulta el control de calidad del material, por falta de accesibilidad, además, si se quisiese modificar o retirar el aislante se tendría que levantar todo el suelo hasta descubrir las cámaras y extraer el material completamente.



Figure 1.14: Ejemplo de aplicación de aislamiento térmico por insuflado en cerramiento con cámara de aire. Fuente: Thermofloc España y Portugal [209].

## 1.6.2 Proyección

La aplicación por proyección se consigue aplicando el material en estado líquido o semilíquido sobre la superficie que se desea aislar. Una vez aplicada una fina capa, el material se adhiere a la superficie y comienza a expandirse rellenando juntas, huecos y cualquier filtración existente. Después de unos segundos el material se solidifica completamente. Como la expansión del aplicado no es controlada se requiere personal especializado con el equipo de proyección de alta presión y las medidas de seguridad necesarias para aplicar una capa uniforme y suficiente. La espuma de poliuretano proyectado (PUR) es el ejemplo más conocido por su alta capacidad aislante, ésta crea un manto aislante monolítico una vez se expande que queda completamente fijada a la superficie deseada.[137, 217]

Esta aplicación sirve tanto para obra nueva como para rehabilitación, se emplea especialmente para aislamiento de cubiertas por la cara interior pudiendo aplicarse sobre el forjado o entre las viguetas, en muros donde se busca una aplicación uniforme que elimine todas las juntas o con cámaras de aire con restricciones de accesibilidad donde no sea factible colocar paneles. Como se ha mencionado, el material se adhiere con firmeza a la superficie y permite aplicaciones en ladrillo, hormigón, metal y madera, por lo tanto, se puede observar aplicado en exteriores pero deberán incorporar una protección que le cubra de los efectos de la intemperie.

La espuma proyectada presenta una conductividad térmica muy baja, se obtiene una aplicación continua que sella huecos e imperfecciones de la superficie creando un soporte rígido que apoya la estructura, posee una gran adherencia al material, es hidrófuga, creando una barrera que evita filtraciones que sí permite el paso de vapor de agua de manera controlada, regulando la circulación de vapor y evitando condensaciones. Aunque frente a los niveles de transpirabilidad de los materiales fibrosos es menor, por lo tanto, se debe cuidar la aparición de condensaciones. Por último, su aplicación es rápida y porta una gran versatilidad que instala un material con una larga vida útil sin necesidad de mantenimiento ya que no reduce el volumen con el tiempo, se resiste al asentamiento y no pueden penetrar ni plagas ni microorganismos.

Las limitaciones de este material son el coste elevado del material siendo el poliuretano proyectado el más caro, además de necesitar una aplicación especializada en condiciones de obra, se debe tener mucho cuidado con la exposición al sol ya que de manera prolongada puede degradar las superficies expuestas, también es un material combustible y emite humo tóxico al arder, por lo que hay que asegurarse de instalar las protecciones necesarias frente al fuego. Por último, se debe considerar el impacto ambiental ya que el poliuretano procede del petróleo y no incorpora un proceso de reciclado, por lo tanto, su uso conlleva unas emisiones y consideraciones adicionales por trata de residuos.



Figure 1.15: Ejemplo de aislamiento de techo con un sistema proyectado de espuma de poliuretano. Fuente: Ecogreenhome [104].

### 1.6.3 Paneles

El panel es una estructura rígida o semirrígida prefabricada con el material aislante, para su instalación se empotra en la superficie a aislar. Los paneles más comunes son paneles de espuma plástica con materiales como EPS, XPS o PUR, paneles fibrosos de lana mineral o fibras de madera y el panel sándwich compuesto, el cual incluye una capa de protección además de ser compatible con todos los materiales mencionados en el resto de paneles. Tanto las dimensiones como las características térmicas se pueden ajustar en fábrica, una vez ajustado la instalación es rápida cubriendo toda la superficie con grandes paneles fijados mecánicamente a la superficie con anclajes, tornillería o pegamentos (mortero especial), una vez fijado se cubre con una capa de protección por mortero.[222, 135]

Esta alternativa se utiliza en fachadas, cubiertas, suelos, tanto en obra nueva como en rehabilitación por su versatilidad. Por ejemplo, para fachada exterior se instala el SATE, el caso de los paneles sándwich autoportantes se aplica en fachada industrial con un acabado metálico en el exterior e interior. Para aislamiento interior también se puede observar en formato de trasdosados donde se emplea un revestimiento interior sobre las paredes en formato de placas de lana mineral o XPS entre montantes metálicos. En cubiertas también se encuentran tanto en el forjado como entre los elementos estructurales utilizando materiales como XPS o PUR sobre una cubierta invertida antes de la capa de impermeabilización. En suelos también se puede instalar tanto sobre el forjado como bajo el pavimento.

Gracias a la adaptabilidad de los materiales del panel y los formatos existentes se obtiene una versatilidad acompañada por una instalación sencilla y de las más rápidas porque el panel llega a obra prefabricado y preparado para su instalación con el espesor y características necesarios, sobresaliendo por sus propiedades de absorción de ruido aumentando el confort acústico de la vivienda. Además, poseen una elevada resistencia mecánica, en el caso del panel de sándwich, la estructura de

perfiles metálicos puede soportar esfuerzos considerables, pudiendo cubrir grandes superficies sin necesidad de instalar apoyos intermedios.

Los paneles se fabrican en tamaños estandarizados, por lo tanto, en obra se tendrá que cortar y ajustarse a las dimensiones de la superficie con sus formas y geometrías irregulares, por lo tanto, cuanto más complicada sea la geometría, más difícil será ajustar el prefabricado además de reducir el espacio útil del interior de la vivienda, reduciendo aproximadamente entre 4–8 cm por muro. A la hora de juntar paneles también se debe prestar atención a la uniformidad de las juntas y su impermeabilización si se ubica en cubiertas o fachadas exteriores para conseguir una capa lo más continua posible que evite filtraciones, entrada de humedad o pérdidas energéticas. Las últimas consideraciones de esta alternativa tienen que ver con el tamaño de los paneles, dificultando su transporte y almacenaje, además de la gestión de residuos después de la instalación.

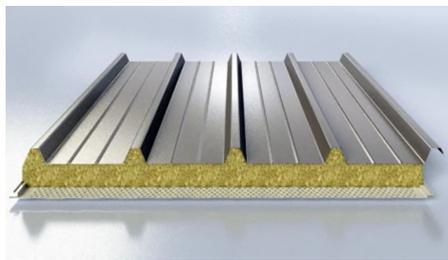


Figure 1.16: Ejemplo de aislamiento por panel en fachada con sistema autoportante. Fuente: Aceroform [52].

#### 1.6.4 Sistemas multicapa reflectivos

Este sistema incorpora un conjunto de finas capas de materiales reflectantes como el aluminio puro o aluminizado junto con capas aislantes como espumas de polietileno reticulado, burbujas de aire encapsuladas o fibras térmicas entre capas que combinan el comportamiento del aislamiento con la capacidad de reflejar hasta un 95% de la radiación térmica que incide sobre el material, reduciendo así el calentamiento por radiación mientras que las capas aislantes se encargan de frenar la transferencia por conducción y convección. Junto a las capas reflectivas es necesario incorporar cámaras de aire estancado para potenciar el efecto reflectante y reducir aún más el efecto por convección convirtiéndola en una barrera radiante eficaz, esta medida cobra aún más importancia para las láminas con un funcionamiento por emisividad reducida. Esta particularidad le permite obtener grosores mucho menores manteniendo las mismas características de aislamiento frente a otros materiales[2].

Debido a su espesor reducido esta tecnología es especialmente útil para apli-

caciones donde el espacio es limitado y el espesor del material es prioridad, casos como la rehabilitación de cubiertas inclinadas con pequeños huecos para introducir el material sin afectar la altura del techo de la vivienda inferior, también se instala en trasdosados interiores, suelos técnicos y buhardillas. Con un mejor comportamiento en climas cálidos por su capacidad reflectiva, se recomienda para casos con exceso de sol y verano muy calurosos para aprovechar toda su capacidad, su bajo espesor permite generar un sistema ligero, fácil de transportar y manipular, resistente a la humedad y con capacidades de aislamiento acústico, aunque el mayor inconveniente es la falta de inercia térmica, también por su espesor, el material no es capaz de combatir la fluctuación de temperaturas porque no puede almacenar calor, por lo tanto, no se recomienda para climas con grandes oscilaciones de temperatura entre el día y la noche, tampoco se recomienda su uso en espacios en contacto con fuentes de calor directo o como única medida de aislamiento.[125, 194]



Figure 1.17: Ejemplo de aislamiento por sistema multicapa reflectivo en cubierta.  
Fuente: Antihumedades [59]

Material	Conductividad (W/m·K)	Reacción al fuego	Reducción acústica	Resistencia a la humedad	Aplicaciones típicas	Ventajas	Desventajas
EPS	0.033-0.047	E-F sin tratamiento, B con tratamiento ignífugo	2-6 dB	Baja con pérdidas de propiedades si se moja, 2% (agua absorbida); $\mu \approx 30-70$	Fachadas ETICS, forjados, suelos interiores	Económico, fácil de cortar, buen aislante térmico	Baja resistencia a humedad y fuego
XPS	0.025-0.040	E-Apta acorde a EN 13501-1)	2-5 dB	Muy baja 1% (agua absorbida); $\mu \approx 80-250$	Cubiertas, sótanos, suelos	Alta resistencia mecánica, impermeable	Menor transpirabilidad, más caro que EPS
PUR	0.019-0.040	E-F Inflamable con humo tóxico	2-4 dB	Muy baja $\mu \approx 60-100$	Sellado de huecos, cubiertas interiores	Gran adherencia, excelente aislamiento, monolítico	Costoso, combustible, emisión de COV
Lana de roca	0.030-0.050	A1 (incombustible)	$\geq 20$ dB entre 40-50 dB	Hidrófoba $\mu \approx 1-3$	Techos falsos, fachadas ventiladas, compartimentación	Incombustible, excelente aislamiento acústico y térmico	Pesada, puede ser irritante
Lana de vidrio	0.030-0.050	A1 (incombustible)	$\geq 20$ dB, similar a lana de roca	Buena con tratamiento $\mu \approx 1-5$	Conductos, particiones interiores	Económica, ignífuga, buen aislamiento	Irritante, requiere protección personal
Corcho	$\sim 0.037$	E-B con tratamiento ignífugo	30-35 dB estructura celular cerrada	Moderada $\mu \approx 7-14$	Fachadas, interiores ecológicos	Natural, sostenible, confort acústico	Coste, combustible, requisito de espesor elevado

Table 1.1: Comparativa técnica y de uso de materiales aislantes. Fuente: Elaboración propia.

## 1.7 Tipología constructiva

### Obra nueva

Obra nueva se refiere a proyectos de nueva construcción, albergando una mayor libertad para incorporar tecnologías de aislamiento punteras con la libertad de comenzar la implementación del aislamiento desde la fase de diseño. Además, los requisitos del Código Técnico de la Edificación son más estrictos precisamente por su capacidad de adaptarse a niveles mayores de transmitancia térmica y eficiencia energética. Como consecuencia se establece un proceso de optimización de la envolvente térmica del proyecto para aprovechar los recursos que aporta un proyecto nuevo pudiendo seleccionar los materiales y sistemas desde cero.

### Rehabilitación

La rehabilitación es una intervención en la vivienda que modifique al menos el 25% de la envolvente térmica. Al igual que en obra nueva, las modificaciones también deberán cumplir unos valores de transmitancia térmica (especificados en DB-HE1 y más adelante). La restricción que se añade en la rehabilitación es la necesidad de ajustarse a las características iniciales de la vivienda. Como se ha mencionado anteriormente, algunas opciones de aislamiento requieren cámaras de aire, accesibilidad para colocar el material o la compatibilidad con el acabado existente.

## 1.8 Ventajas y desafíos del aislamiento térmico

Como se ha ido mencionando a lo largo del estudio, el aislamiento juega un papel crucial para mejorar la eficiencia energética y el confort de la vivienda. Uno de los factores por los que en España es aún más importante es por las oscilaciones de temperatura que se experimentan entre estaciones, estresando el material y degradándolo rápidamente. De acuerdo con datos de la Comisión Europea, el sector de la edificación ocupa un 40% del consumo de energía total y genera el 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la Unión Europea[50]. En España la situación empeora ligeramente por ser un parque edificatorio de mayor antigüedad y menor eficiencia, por ello, la mejora de la eficiencia energética por medio del aislamiento térmico es un comienzo para mejorar la sostenibilidad global.

### Ventajas

Las ventajas del aislamiento térmico son:

- **Ahorro energético:** Aislar una vivienda significa reducir el consumo energético por climatización. Los climas con grandes oscilaciones de temperatura sufren las mayores pérdidas energéticas, forzando a los habitantes a compensarlo con sistemas de climatización. Según datos del IDAE, las rehabilitaciones que incluyen aislamiento térmico reducen entre un 30–50% la demanda energética[50]. Considerando que hasta el 70% del consumo energético proviene de calefacción y refrigeración, reducirlo tiene un gran impacto, como demuestra el Grupo Eureka en un caso práctico, disminuyendo la demanda de 183,6 a 89,0 kWh/m<sup>2</sup> · año (reducción del 51,5%)[7].
- **Mejora del confort:** El aislamiento térmico reduce la oscilación de las temperaturas en el interior de las viviendas limitando el flujo entre el interior y el exterior consiguiendo un ambiente confortable sin necesidad de apoyarlo con sistemas de climatización. A su vez, la mayoría de materiales de aislamiento térmico consiguen también un aislamiento acústico que bloquea el ruido del exterior, un factor muy importante si la vivienda se encuentra en un entorno urbano ruidoso, aumentando la confortabilidad de la vivienda al aislarlo del ruido externo.
- **Impacto ambiental:** La disminución del consumo energético tiene como consecuencia reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, un objetivo perseguido por los retos de descarbonización motivando la aplicación de este tipo de soluciones.

- **Ahorro económico:** Aunque la inversión inicial pueda ser elevada, el ahorro energético es capaz de amortizar el coste. Según el IDAE, el periodo de retorno habitual para una rehabilitación energética suele estar entre 5 y 7 años[14], mientras que la vida útil de los materiales supera este margen, asegurándose su amortización y alcanzando incluso 8 o 9 veces la inversión inicial en casos optimizados. Además, mejorar el aislamiento también puede elevar la calificación energética de la vivienda, se estima que una mejora de una letra equivale a una subida del valor de la vivienda de alrededor del 1,3%, pudiendo llegar a 4% en el norte de España, por sus condiciones climatológicas, revelando no sólo un interés normativo pero también el mercado.
- **Prevención de humedades y patologías:** Las humedades surgen desde los puntos fríos de la vivienda donde se puede producir condensación, el edificio mal aislado se identifica si se pueden ubicar múltiples puntos fríos o puentes térmicos en la vivienda. Asimismo, pueden aparecer moho y hongos que se aprovechan de los puntos fríos y de su condensación provocando mal olor y un riesgo de salud para los inquilinos.
- **Durabilidad:** Como se ha mencionado previamente si el sistema se coloca correctamente, la vida útil del material se empieza a considerar comparable a la del edificio. Además, no requiere revisiones periódicas ni mantenimiento, el material se mantiene funcional sin necesidad de intervenir.

## Desafíos

Los desafíos del aislamiento térmico son:

- **Coste inicial:** El coste de instalar aislamiento térmico dependerá de las necesidades de la vivienda y, más importante, del material y método de instalación. Un SATE podrá crear una envolvente térmica continua y uniforme, pero requiere una inversión inicial mayor. El obstáculo está en que toda reforma requiere un equilibrio de gastos donde se debe considerar la prioridad del aislamiento y el presupuesto que se tendrá que cumplir.
- **Poco prioritario en reforma no específica:** El segundo problema del aislamiento térmico es la falta de prioridad en reforma de diseñar la vivienda con una cobertura aislante en condiciones. Esto surge porque los problemas de confort a menudo son sutiles y parecen no notarse, pero una vez mejorada la envolvente térmica se crea un impacto tangible. Aun así, sigue sin ser prioritario por la necesidad de introducir el aislante, necesitando levantar techo, suelo y paredes.

- **Mano de obra cualificada:** Disponer de personal cualificado es esencial para asegurar que la ejecución sea correcta sin dejar filtraciones o falta de anclajes. Es importante planear con un equipo de ingenieros y arquitectos que se involucren en una fase de diseño para luego comunicarlo a los instaladores especializados. Esta mano de obra, en España, se encuentra en un déficit de trabajadores que puedan cubrir estas tareas.
- **Espacio útil y estética de la vivienda:** Como se ha mencionado anteriormente, el aislante interior trae como consideración la disminución de espacio útil de la vivienda por el espesor dedicado para ubicar el aislamiento. Esto puede llegar a ser un factor decisivo ya que algunas personas priorizan espacio habitable sobre el confort térmico. Además, para el aislamiento exterior se necesita manipular el exterior del edificio, pudiendo llegar a obstáculos en propiedades protegidas o con restricciones estéticas.
- **Incompatibilidad técnica o normativa:** Las limitaciones técnicas, legales o administrativas que pueden aparecer pueden ocurrir en situaciones cuando hay que respetar la normativa de conservación de un edificio por ser histórico o estar protegido. En este caso, puede restringir las modificaciones que se puedan hacer. Otro caso se presenta cuando hay que modificar una propiedad compartida; por ejemplo, una comunidad de vecinos deberá de llegar a un consenso antes de tomar ninguna medida. Incluso hay casos en los que el Código Técnico de la Edificación restringe la instalación de la envolvente porque no se puedan cumplir los espesores mínimos de la normativa[30].

## 1.9 Marco político

El Código Técnico de la Edificación (CTE) incluye un conjunto de marcos políticos y normativos que se centran en la mejora de la envolvente térmica del parque inmobiliario con el fin de conseguir reducir las pérdidas, la demanda energética y cumplir con los objetivos de descarbonización europeos.

Un factor importante antes de instalar cualquier aislante térmico es asegurarse del cumplimiento con la normativa del Código Técnico de Edificación (CTE). En 1979 se introdujo la primera normativa respecto al aislamiento y se estima que hasta el 60% no incorporan siquiera la primera normativa, por ello, España se encuentra en una situación de pérdidas energéticas y baja eficiencia debido a la antigüedad del parque inmobiliario y su falta de medidas para adaptarse al nuevo reglamento [19].

En 2019, España actualizó el Documento Básico DB-HE "Ahorro de Energía" del Código Técnico de la Edificación mediante una Orden Ministerial. La actualización incluyó requisitos más estrictos para el aislamiento térmico, reflejados en

el DB-HE1 “Condiciones para el control de la demanda energética” [8]. Como consecuencia, los espesores se duplicaron, incluso, en algunos casos se triplicaron para cumplir con los nuevos valores. Este documento tiene como finalidad “limitar las necesidades de energía primaria para alcanzar el bienestar térmico según la zona climática de su ubicación, del perfil de temperaturas de verano y de invierno, del uso del edificio y, en el caso de edificios existentes, del alcance de la intervención”.

## Directivas europeas

Primero se expondrán las acciones tomadas por la UE para cumplir con la mejora del aislamiento térmico y la eficiencia energética de los edificios porque está en la cabeza del progreso mientras que España crea la normativa cuando la UE actúa de catalizador. Las directivas más importantes son:

- **Directiva 2010/31/UE (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD)** Directiva europea que busca crear una serie de estándares que mejoren la eficiencia energética del edificio estableciendo el valor mínimo que deben alcanzar los edificios de obra nueva y rehabilitación, con una revisión cada 5 años que registre la mejora. Se actualizó en 2010 introduciendo el objetivo de que los edificios de nueva construcción sean de consumo casi nulo (nZEB) a partir de 2020 (2018 para edificios públicos), para normalizar este proceso se incluye la obligatoriedad de obtener el Certificado de Eficiencia Energética del inmueble creando transparencia del estado energético de la vivienda. Por último, en 2018 se refuerza en la Directiva 2018/844 algunos cambios como la preinstalación de cargadores eléctricos en zonas de estacionamiento y promueve la instalación de sistemas de automatización[8].
- **Revisión EPBD** El Parlamento Europeo aprueba una revisión en marzo de 2023 que incluye un refuerzo de las exigencias en materia del aislante y rehabilitación. El concepto de edificio casi nulo (nZEB) se transforma en un edificio cero emisiones para reducir al máximo el impacto medioambiental incluyendo el uso del propio edificio como la fabricación de todos los materiales e instalación de los equipos. A partir de 2028, todos los edificios públicos deberán cumplir la restricción de cero emisiones, para el resto de edificios se comenzará en 2030, consiguiendo una promoción directa de la mejora de aislamiento y el uso de sistemas de climatización soportados por energías renovables. No solo deberán de cumplir con esa fecha límite sino que se establece un seguimiento con unos límites que revelarán la trayectoria de esta evolución, en 2030 se establece un 16% de mejora de la eficiencia energética respecto al 2020 y en 2035 se obligará a alcanzar entre el 20–22%, aunque el desarrollo se adapta a la clase energética de cada espacio comenzando la

mejora con los edificios con peor envolvente térmica. Se crea el pasaporte de renovación que plantea una hoja de ruta que ayude al propietario a entender cómo cumplir con los objetivos[20].

- **Directiva 2012/27/UE (Eficiencia Energética General, EED)** Se establecen metas para la reducción de alrededor del 40% del consumo de energía primaria para 2030, obligando a las administraciones públicas a una renovación de al menos 3% de la superficie total de edificios gubernamentales, también se exigen auditorías energéticas para las empresas grandes ayudando a promocionar sistemas de gestión energética. En paralelo se crean fondos que estimulan el desarrollo y ayudan a potenciar la actualización del parque inmobiliario[23].

## Estrategia climática europea

- **Pacto Verde Europeo (2019)**: Desde 2019 , cuando se presentó la hoja de ruta que situaría a la UE en el camino para lograr la neutralidad climática en 2050. La rehabilitación de los edificios se ubica como prioridad para conseguir reducir las emisiones y estimular la economía y sirvió como catalizador para la creación de más proyectos con similares objetivos como la revisión de normas, la inclusión de inversiones considerables para lubricar la mejora de viviendas y edificios públicos, a la vez que pone el foco en eliminar la pobreza energética que afecta a alrededor de 40 millones de europeos[23].
- **Renovation Wave (2020)**: En 2020 se crea una nueva estrategia motivada por el Pacto Verde Europeo que procura acelerar los objetivos de este. Primero apunta a duplicar la tasa anual de renovaciones energéticas de reforma integral en Europa hasta 2030 con el objetivo de llegar a renovar 35 millones de edificios. Esta primera medida consigue la reducción de la demanda energética pero además genera 160.000 empleos de construcción. El plan de acción consiste en aumentar la disponibilidad de información, acceso a financiación y de mano de obra especializada en mejoras de eficiencia. Este plan de acción consigue la revisión de las propuestas legislativas anteriores y propone actualizarlas para impulsar el aislamiento térmico lo máximo posible[23].
- **Estrategia Fit for 55 (2021)**: La Comisión Europea presenta en 2021 un paquete legislativo integral que revisita las políticas europeas y crea un nuevo objetivo, la reducción de 55% (respecto a 1990) de las emisiones de efecto invernadero para 2030, con el foco en alcanzar la neutralidad en 2050. Se revisan los valores de EPBD y EED respecto a los estándares mínimos de la calificación energética, esto obliga a todos los edificios con una calificación

inferior a “G” se mejorará a la calificación “F” antes de 2030 para viviendas residenciales y 2027 para edificios públicos, esto obliga a los espacios con la peor envolvente térmica a mejorar. También se aportan ayudas como el Fondo Social para el Clima que aporta una gran ayuda a los hogares que reportan mayor vulnerabilidad económica. A su vez, se plantea un nuevo mercado de carbono (ETS2) que pretende comerciar con combustible (transporte, climatización) buscando encarecer el precio de combustibles fósiles para reducir el consumo por climatización a costa de conseguir una mejora del aislamiento térmico[17].

## Objetivos, políticas y estrategia de España

A raíz de la actualización de la posición europea respecto a eficiencia energética, emisiones y sostenibilidad, se comienza a buscar una convergencia de objetivos a largo plazo, para entender las similitudes, se presentan los principales apartados del marco político español que se alinean con la iniciativa europea a largo plazo.

El año 2050 acarrea gran importancia, marca el punto en el que se revisarán los resultados de las acciones que comenzaron con las primeras directivas de 1979, se ha podido observar cómo paulatinamente se va reforzando la mejora, prueba de ello son los objetivos de descarbonización del Pacto Verde, aplicado en España por la Ley 7/2021 se obtendrá un parque edificatorio con emisiones nulas en 2025, asegurando que todos los edificios de obra nueva y rehabilitación sean energéticamente eficientes y hayan completado el proceso de descarbonización[17].

Aunque, además de la meta final, se establecen metas intermedias. Acorde con la estrategia Fit for 55 que apunta a obtener una reducción de las emisiones de gases invernadero globales del 55% para 2030, esto incluye el consecuente compromiso de España para cumplir con su parte, la ley de cambio climático plantea reducir un 23% sus emisiones respecto de 1990, a lo que la Unión Europea decidió elevar el objetivo a raíz de la EED (Directiva 2012/27/UE) a una mejora del 36–39% de reducción del consumo de energía primaria para 2030, acorde a Europa, España seleccionó un 39,5%. Renovation Wave también impactó la iniciativa española, el compromiso europeo de procesar la reforma de 35 millones de edificios se transformó en el compromiso de reforma de 1,2 millones de edificios en España desde 2021 hasta 2030, aprobado por el PNIEC, actualmente los valores de mejora (300.000 viviendas/año) duplica la tasa de mejora registrada anteriormente[21].

La actualización de Código Técnico de la Edificación de 2019 incluye las novedades de la EPBD, con la propuesta de edificios nuevos nZEB a partir de 2020, consiguiendo en 2024 la adaptación del estándar de cero emisiones para 2030, esto significa incluir nuevos estándares mínimos de rendimiento de edificios existentes, principalmente comenzando con los edificios públicos y con una envolvente con baja calificación energética. Una actualización importante del CTE por medio del

DB de Sostenibilidad Ambiental es la consideración de incluir el estudio del ciclo de vida y huella de carbono de los materiales para reducir aún más el impacto ambiental[24].

## Normativa de España

- **Código Técnico de la Edificación (CTE):** Se especifica en el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) los valores mínimos de eficiencia energética. La sección HE1 afecta a la demanda energética estableciendo el requisito que debe cumplir la envolvente térmica[30].
- **Real Decreto 732/2019:** A raíz de las directivas europeas que surgen se crean nuevas actualizaciones para el CTE endureciendo los criterios del DB-HE sobre la definición de edificio de consumo casi nulo. El Real Decreto establece que ningún edificio de nueva obra debe superar los valores de demanda energética definidos en HE0 y HE1[29].
- **Real Decreto 390/2021:** Se regula el proceso para obtener la certificación energética de edificios, exige la posesión de la etiqueta de eficiencia energética para poder comerciar con la vivienda y refleja las características del inmueble, entre otras, el aislamiento utilizado en la envolvente[18].
- **Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética:** Se establecen nuevos objetivos para reducir las emisiones del parque inmobiliario para 2030 y 2050, como la obligación de buscar la mejor calificación en proyectos de contratación pública buscando motivar la rehabilitación de los edificios con objetivos claros de descarbonización y eficiencia energética para 2050[17].
- **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC):** Se apoyan los objetivos de descarbonización con una meta de reducción de hasta el 23% para 2030, respecto a 1990 con medidas para estimular la renovación energética apoyado por la mejora del aislamiento térmico que busca disminuir la demanda energética de climatización[21].

### 1.10 Zonas climáticas en España

Las zonas climáticas se agrupan por áreas que reúnen características climáticas similares para adaptar los requisitos del CTE a las condiciones específicas de cada zona. Además, debido a la diferencia de climas entre el norte y sur de España, se simplifican las recomendaciones para poder tratar con casos predeterminados

por zona climática. Conocer la zona climática donde se va a realizar la reforma es fundamental para que el diseño pueda adaptarse a las características de la ubicación. Se distinguen las zonas climáticas de invierno ( $\alpha$  - clima más suave, A, B, C, D, E - clima más frío) y verano (1 - verano suave, 2, 3, 4 - verano muy cálido).

- **Zona  $\alpha$ :** Inviernos templados, veranos calurosos y temperatura media superior a 15°C.
- **Zona A:** Inviernos suaves, veranos calurosos y temperatura media entre 12°C y 15°C.
- **Zona B:** Inviernos fríos, veranos cálidos y temperatura media entre 9°C y 12°C.
- **Zona C:** Inviernos muy fríos, veranos suaves y temperatura media entre 6°C y 9°C.
- **Zona D:** Inviernos muy fríos, veranos frescos y temperatura media entre 3°C y 6°C.
- **Zona E:** Inviernos extremadamente fríos, veranos fríos y temperatura media inferior a 3°C.
- **Zona 1:** Verano suave y humedad relativa baja.
- **Zona 2:** Verano cálido y humedad relativa media.
- **Zona 3:** Verano caluroso y humedad relativa alta.
- **Zona 4:** Verano extremadamente caluroso y humedad relativa muy alta.

La combinación de letra y número representa cada municipio español, ayudando a establecer una guía ordenada de valores establecidos de aislamiento. Estas se pueden ver en el Anexo D del CTE-HE, que emplea la altitud y provincia para determinar la zona climática. A continuación se presenta una representación gráfica de la distribución de zonas climáticas de España. Cada zona requiere unos valores de transmitancia térmica máxima ( $U$ ) para asegurar la protección térmica del edificio.

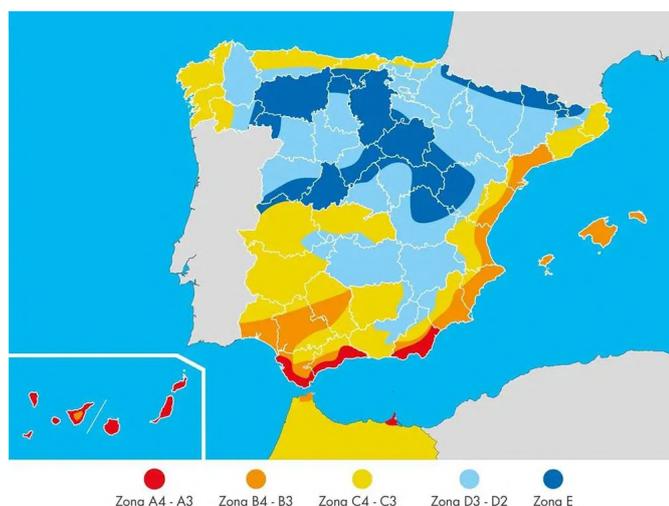


Figure 1.18: Mapa de zonas climáticas de España. Fuente: Reto Kömmerling [196].

**Transmitancia térmica y normativa** La transmitancia térmica representa la cantidad de calor que atraviesa un elemento por unidad de superficie y diferencia de temperatura ( $W/m^2 \cdot K$ ). Un buen aislamiento consiste en obtener la menor transmitancia térmica posible, ya que eso significa que permite pasar una cantidad mínima de calor.

Acorde con el Documento Básico del Código Técnico de la Edificación se establecen los siguientes requisitos de transmitancia térmica límite mencionados anteriormente [3, 42].

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica,  $U_{lim}$  [ $W/m^2K$ ]

Elemento	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior ( $U_s, U_M$ )	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior ( $U_c$ )	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno ( $U_T$ ) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica ( $U_{MD}$ )	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) ( $U_H$ )*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%			5,7			

\*Los huecos con uso de escaparate en unidades de uso con actividad comercial pueden incrementar el valor de  $U_H$  en un 50%.

Figure 1.19: Valores límite de transmitancia térmica. Fuente: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [30].

Esta tabla nos permite calcular el espesor mínimo necesario para cumplir la

normativa utilizando los valores de conductividad térmica de cada material. Este cálculo garantiza la calidad térmica mínima del aislante y, gracias a las nuevas actualizaciones, al cumplir con los valores mínimos se obtiene un comportamiento cercano a las emisiones de un edificio casi nulo (nZEB). La normativa resalta la importancia de diseñar la envolvente de los edificios con el espesor óptimo de aislamiento como la estrategia más eficiente y rentable. Ante estas nuevas exigencias, el Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) se presenta como una solución constructiva efectiva, asegurando un alto nivel de confort interior.

Para cumplir con los nuevos requisitos, se propone mejorar la envolvente mediante el tratamiento de puentes térmicos y el incremento de los espesores de aislamiento, detallados en el Apéndice E del DB-HE1, que ofrece valores indicativos adaptados a las distintas zonas climáticas de España. Las dimensiones de aislamiento son referenciales y deben ajustarse según el diseño del edificio y las características de los materiales utilizados.

## 1.11 Reacción al fuego

Otra consideración que se debe tener a la hora de diseñar la envolvente térmica es la reacción al fuego de cada material y las protecciones que sean necesarias para cumplir la normativa. El Código Técnico de la Edificación (CTE) posee una clasificación (Euroclase) de las reacciones al fuego restringidas según la altura del edificio en la Sección SI 2 del DB-SI (Seguridad en caso de Incendio), recibió su última actualización en el Decreto 732/2019 que establece una Euroclase mínima para edificios con una envolvente superior al 10% de la superficie total de la fachada:

- Fachadas con altura hasta 10 metros, la clasificación debe ser **D-s3,d0**.
- Fachadas con altura hasta 18 metros, la clasificación debe ser **C-s3,d0**.
- Fachadas con altura superior a 18 metros, la clasificación debe ser **B-s3,d0**.

La Euroclase hace referencia a la resistencia que tiene que aguantar todo el sistema, es decir, el material aislante en el formato que se instale en la fachada con la capa de resistencia al fuego EI-30 que ofrece una barrera cortafuegos de al menos 30 minutos, en caso de que la instalación no equiepe este sistema, el propio material aislante deberá cubrir las propiedades ignífugas.

Adicionalmente, se protege la planta baja con una barrera superior para prevenir el comienzo del fuego en la base, se exige en edificios con una altura hasta 18 metros con una cubierta transitable en la planta baja equipar un mínimo de 3,5 metros de altura de fachada y aislante de clase **B-s3,d0**.

## Clasificación ignífuga

El sistema de Euroclase de reacción al fuego posee una clasificación ignífuga creada por la norma **UNE-EN 13501-1**, un sistema con 3 clasificaciones:

- Clase principal por su contribución al fuego: **A1** (poco combustible), **A2, B, C, D** (medio), **E o F** (muy combustible).
- Generación de humos: **s1** (poco humo), **s2, s3** (mucho humo).
- Producción de partículas inflamadas: **d0** (no produce), **d1, d2** (produce).

Las clases más habituales son: La categoría más estricta que sólo se exige para edificios altos de más de 18 metros, **clase B-s3,d0**, ofrece un comportamiento con una leve contribución al fuego, sin limitación de humo y sin producción de partículas inflamadas. **C-s3,d0** y **D-s3,d0** son aislantes con las mismas propiedades pero empeora el comportamiento al fuego, siendo más combustible, se exigen para edificios con fachadas de entre 10 y 18 metros para la clase **C-s3,d0** y en edificios bajos de hasta 10 metros de altura la clase **D-s3,d0**. En caso de que el edificio tenga una fachada ventilada, el riesgo de propagación es mucho mayor. Se exige **clase B-s3,d0** para edificios de entre 10 y 28 metros y para edificios superiores se exige la **clase A2-s3,d0**, casi completamente protegida del fuego, además de incorporar en todas las instalaciones sesiones cortafuegos entre plantas.

A continuación se incluye una tabla con los materiales aislantes más comunes y su clase:

Tipo	Material	Euroclase	Aplicación
Aislamiento mineral	Lana mineral	A1	Posee el mejor comportamiento y se permite en todo tipo de edificios.
Aislamiento ecológico	Celulosa	B-s2,d0	Se fabrica con el tratamiento ignífugo, permitido en edificios >18m.
	Corcho natural	E	Permitido solo en fachadas muy bajas y con uso de revestimiento.
Aislamiento sintético	Poliestireno expandido (EPS)	E	Requiere mayor protección.
	Poliestireno extruido (XPS)	E	Mejor que EPS pero también requiere una instalación con capas de protección que eleven la Euroclase.
	Poliuretano - panel rígido (PUR)	B-s2,d0 con tratamiento ignífugo	Válido en todo tipo de edificios, incluso mejora el valor de generación de humos.
	Poliuretano proyectado	E	Sin revestimiento ignífugo solo es válido para edificios bajos (<10m), con revestimiento puede alcanzar las clases D, C y B.

Table 1.2: Clasificación Euroclase y aplicación según tipo de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.

## 1.12 Coste de materiales y mano de obra

A continuación, se presenta el coste aproximado de la instalación completa desglosado en costes de material con un rango dependiente del grosor del material, coste de mano de obra y protección recomendada. Respecto a la mano de obra, se establece que para todas las técnicas que se utilizarán en este apartado (aislamiento interior para vivienda unifamiliar en edificio residencial), la mano de obra es de 6 €/m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia). Este cálculo surge de un análisis de casos reales donde el precio medio del aislante (lana mineral), incluyendo la instalación, cuesta 14 €/m<sup>2</sup> y el precio medio del aislante lana mineral oscila entre 6-8 €/m<sup>2</sup>, por lo tanto, la mano de obra se sitúa en 6 €/m<sup>2</sup>. También se incluye el precio de la instalación de pladur para proteger el material aislante, siendo este 36 €/m<sup>2</sup>, donde 30 €/m<sup>2</sup> corresponden a materiales de fijación, montantes, canales y el propio pladur, y 6 €/m<sup>2</sup> a la mano de obra. Evidentemente, esta generalización se realiza para simplificar el cálculo, pero cada compañía ofrecerá un rango de precios adaptado a sus servicios.

- **PUR proyectado:** El coste del material en formato de espuma oscila entre 10-15 €/m<sup>2</sup> para 3 cm de espesor (para climas templados), 15-25 €/m<sup>2</sup> para 5 cm de espesor (para climas fríos) y 25-40 €/m<sup>2</sup> para el panel rígido. Los costes añadidos serán la mano de obra, incluyendo un extra en caso de necesitar sanear, limpiar o aplicar protección sobre las superficies sensibles. Para la protección ignífuga no es necesario hacer ningún ajuste si el propio material ya ha certificado pertenecer a la clase B-s2,d0[5].
- **EPS:** El formato de panel semirrígido se puede encontrar en grosores desde 40 a 80 mm, oscilando entre 5 y 13 €/m<sup>2</sup>. El material pierde sus propiedades con la humedad, por lo tanto, se debe proteger. Más adelante se enumeran distintas vías constructivas para proteger el aislante, aunque la aplicación más habitual es la colocación de un revoco exterior, protegiendo el material del fuego y la humedad, encontrándose por 20-32 €/m<sup>2</sup> (material + instalación)[12].
- **XPS:** Incorpora el formato de panel rígido. Dependiendo del grosor, el precio aproximado del material aislante es 7-10 €/m<sup>2</sup> para un perfil de 40 mm, 10-12 €/m<sup>2</sup> para 50 mm y 12-15 €/m<sup>2</sup> para 60 mm. Al igual que el EPS, este también requiere una capa de protección para aumentar su durabilidad. Habitualmente es un material que se instala sobre la cubierta y se protege con una lámina de EPDM que sella el forjado, evitando filtraciones, y se fija con un lastre o losa filtrón que aporta peso sobre las planchas sirviendo también como protección contra la radiación UV. El precio del material de protección con su instalación es de 19 €/m<sup>2</sup>[13].

- **Lana mineral:** Los formatos son lana de roca, un panel de 40 mm de espesor oscilando entre 4-6 €/m<sup>2</sup>, protegido por un sistema de trasdosado interior de pladur que ronda 30-40 €/m<sup>2</sup>. La lana mineral tiene muy buen comportamiento al fuego (Euroclase A1) y el trasdosado posee una Euroclase A2. Por lo tanto, solo es necesario tener en cuenta que requiere una barrera de vapor en caso de ser una cubierta fría[25, 16].
- **Celulosa insuflada:** Este material se instala a granel con una máquina de insuflado. Este formato permite fugas, por lo tanto, se protege con una lámina freno-vapor variable en la parte caliente y se sella con una cámara cerrada consiguiendo una reacción al fuego B-s2,d0[1]. Además, puede necesitar otra protección externa ya que solo es capaz de admitir un 15% de agua antes de perder sus propiedades térmicas. El material aislante tiene un precio de 15-35 €/m<sup>2</sup>.

Sistema	Conductividad térmica $\lambda$ (W/m·K)	Reacción al fuego	Factor de difusión $\mu_{H_2O}$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Coste material (€/m <sup>2</sup> )
PUR proyectado	0.026	F	40 – 100	30 – 60	10 – 20
Panel PUR	0.024	C-s3,d0	70 – 120	30 – 40	20 – 45
EPS	0.029 – 0.038	E	30 – 70	15 – 25	5 – 13
XPS	0.029 – 0.04	E	150 – 200	30 – 45	7 – 15
Lana mineral	0.032 – 0.04	A1	1 – 2	25 – 140	4 – 12
Celulosa insuflada	0.04	B-s2,d0	1 – 2	45 – 60	15 – 35

Table 1.3: Comparativa técnica y económica de sistemas de aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia.

## 1.13 Protección y formato de instalación

A continuación se resumen los diferentes tipos de protecciones más comunes para aislamiento térmico.

Tipo de protección	Coste del material y mano de obra	Usos
Protección exterior de revoco monocapa con mortero	20 – 32 €/m <sup>2</sup>	Aislamiento exterior con SATE de EPS, XPS o PUR [197]
Trasdosado de Pladur de espesor 98 mm	35 – 50 €/m <sup>2</sup>	Protección de aislamiento térmico y acústico interior de lana mineral y denim reciclado [1]
Barrera de vapor Papel Kraft (Polietileno)	5 – 10 €/m <sup>2</sup>	Protección interior y exterior para superficies frías para control de humedad [31]
Lámina EPDM de espesor 1,2 mm (especial para cubiertas)	9 – 12 €/m <sup>2</sup>	Protección exterior de impermeabilización de cubierta invertida (XPS o PUR) [5]
Losa filtrón drenante de espesor 25 mm	20 – 25 €/m <sup>2</sup>	Sistema de drenaje y protección del aislamiento, especial para cubiertas [22]
Subestructura de aluminio con anclajes	55 – 70 €/m <sup>2</sup>	Estructura de fachada ventilada [6]

Table 1.4: Resumen de sistemas de protección complementarios para aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia.

## 1.14 Ayudas y subvenciones

### Fondos NextGeneration y programas PREE

El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) cuenta con un programa de rehabilitación energética residencial (PREE) dedicado a subvencionar reformas con una mejora del ahorro energético superior al 30% que incluye el cambio de envolvente térmica con ayudas de entre 6.300€ a 18.800€ por vivienda según la evolución del ahorro, con el beneficio de estar exenta de IRPF. Además, la parte no subvencionada podrá beneficiarse de una deducción fiscal del 60% en la declaración de la renta [37].

La ayuda procede del fondo NextGenerationEU que dedica 3.420 M€ para cubrir rangos del 40% al 80% de la reforma total. A través del PRTR se designa la gestión del capital a cada Comunidad Autónoma en las oficinas de rehabilitación. Un caso donde se puede ver el impacto de esta ayuda es el Plan Eco Vivienda [38] que abrió una convocatoria de subvenciones destinadas a rehabilitación energética residencial. Sin embargo, los dos resultados públicos tratan la gestión de la subvención para instalar *únicamente* sistemas fotovoltaicos, revelando la realidad de uno de los retos del aislante térmico: la falta de prioridad.

Habitualmente las subvenciones de rehabilitación energética ofrecen tres alternativas: reducir el consumo, reducir la demanda o modificar la envolvente, de las cuales la última es la menos común y la única que impacta directamente en el confort de las personas [34].

### Ayudas Estatales

Como se ha mencionado en el apartado anterior, cada Comunidad Autónoma gestiona los programas y organiza el capital para alinear la evolución de la comunidad con los objetivos españoles y europeos de sostenibilidad. Los dos programas existentes actualmente a nivel estatal, ambos regulados por el Real Decreto 853/2021 [32], son el Programa 3 y el Programa 4, y se distinguen por el fin de la ayuda en:

- **Ayudas a actuación a nivel edificio (PREE 5000):** Se ofrece cubrir en edificios completos el 50% de la mejora de la envolvente térmica, el 40% de la mejora de instalaciones térmicas y el 20% de la mejora en iluminación eficiente. Para viviendas o locales individuales el 40% de la mejora de la envolvente térmica, el 30% de la mejora de instalaciones térmicas y el 20% de la mejora en iluminación eficiente. Entre las acciones para poder financiar la mejora están el cambio de la envolvente térmica, sustituir la climatización de combustible fósil a renovable, instalar geotermia, solar térmica, bomba de

calor, tecnologías de control o mejoras de eficiencia energética en iluminación. [39].

- **Programa 3 - Ayudas para la rehabilitación integral de edificios:** Se busca una bajada mayor al 30% del consumo primario original de edificaciones de residencias enteras, cubriendo entre el 40–65% del coste de la reforma con un bonus si el edificio se ubica en una zona desfavorecida, con más de la mitad de personas en situación de vulnerabilidad económica o si alcanza la clase energética B o mejora dos letras del certificado energético [39].
- **Programa 4 - Ayudas para la mejora de eficiencia energética de la vivienda:** Cubre el 40% del coste, con un máximo de 3.000€ por vivienda de las rehabilitaciones en viviendas unifamiliares que consigan una reducción de la demanda energética de por lo menos 7% o una reducción del 30% del consumo energético [35].

# Chapter 2

## Sistemas de Climatización

### 2.1 Introducción

Los sistemas de climatización son esenciales para garantizar el confort de una vivienda. Este se establece en la satisfacción de las condiciones ambientales que satisfagan las necesidades de temperatura, humedad y movimiento de aire de los habitantes de la vivienda. Para ello, existen normativas internacionales (ISO 7730 y ASHRAE 55) que se aseguran de mantener la salud y el bienestar de la sociedad.

En edificios antiguos, la climatización es aún más importante debido a la baja capacidad de aislamiento y el alto consumo energético ocasionado por la pérdida de calor y la baja eficiencia de los sistemas de climatización. Esto genera un doble gasto: llevar la vivienda a condiciones de confort y luego mantenerlas.

España posee climas diversos, variando desde zonas frías con frecuentes precipitaciones hasta zonas más cálidas y secas en el sur y el Mediterráneo. Estos climas son completamente opuestos y requieren diferentes tratamientos para conseguir las condiciones de confort necesarias. Además, el tamaño de la vivienda, el coste de instalación, el consumo energético, el uso de domótica y la variabilidad de la temperatura diaria son factores que influyen en la decisión del sistema de climatización.

La aerotermia representa una alternativa sostenible, alineada con las regulaciones, que promueve la descarbonización, el aumento de la eficiencia energética y el respeto hacia el medio ambiente, a la vez que ofrece un alto rendimiento operativo y económico. Estas soluciones son cada vez más habituales debido a los numerosos intentos de implementar nuevas normativas para mejorar la eficiencia energética de los hogares, un objetivo creado por la Unión Europea para 2030, con el fin de descarbonizar el sector residencial. Algunas de estas medidas incluyen requisitos de eficiencia en el Código Técnico de la Edificación (CTE), la obligación de evaluar la eficiencia de una vivienda mediante el Certificado de Eficiencia En-

energética (CEE)[18], el fomento de la reducción del consumo y del uso de renovables por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2021–2030)[21], y por último, paquetes de subvenciones y ayudas que promuevan la mejora energética de viviendas como el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia[4].

El 39,3% del consumo energético residencial proviene de la calefacción y el 20% está destinado a refrigeración y ACS [93]. Este valor resalta la importancia de mejorar los sistemas de climatización en España.

Este estudio analiza la clasificación de los sistemas de climatización, tanto tradicionales como modernos, describiendo el rendimiento, coste y comparando las aplicaciones de cada alternativa dependiendo de las recomendaciones de cada zona climática, tratando de identificar las alternativas que ofrezcan una eficiencia energética alineada con los objetivos europeos a la vez que mantenga las condiciones de confort de la vivienda.

Para realizar una comparación equitativa de los sistemas de climatización es necesario conocer la demanda térmica que presenta el caso de estudio. El estudio de MITMA [60] resume la demanda por zonas climáticas con la premisa de mantener las condiciones de confort en la vivienda. Los resultados establecen una demanda media de 114,4 kWh/m<sup>2</sup>·año para la zona continental, 88,2 kWh/m<sup>2</sup>·año en la zona del Atlántico norte y 44,1 kWh/m<sup>2</sup>·año en las provincias cercanas al mediterráneo. Estos valores permiten establecer la comparativa para que cada sistema de climatización cubra la demanda energética. Este estudio incluye una vivienda de superficie 90 m<sup>2</sup>, obteniendo unos valores de 10.296 kWh/año en zonas frías, 7.938 kWh/año en las zonas templadas y 3.969 kWh/año en las zonas cálidas. Por lo tanto, se establecen como demandas energéticas para la comparación de 3.000 kWh/año a 6.000 kWh/año en zonas cálidas, hasta 9.000 kWh/año en zonas templadas y hasta 12.000 kWh/año en zonas frías.

## 2.2 Tipos de sistemas de climatización

### 2.2.1 Sistemas convencionales de climatización

#### Caldera de gas natural

Los sistemas de calefacción por calderas emplean combustibles como gas natural, gasóleo o biomasa que, por medio de combustión, generan calor. Esta alternativa se conoce por su alto rendimiento y bajo coste operativo, aunque, comparado con las nuevas energías de fuentes renovables, las cuales ofrecen un coste operativo competitivo, se considera un coste operativo mayor. Representa el 40% de los sistemas de calefacción en España, encontrándose mayoritariamente en entornos urbanos con redes de distribución de gas natural desarrolladas. Aún así, estas

poseen limitaciones de eficiencia, aproximadamente entre el 85% y el 95% [101]. Un valor alto, pero menor que sus competidores. La caldera de gas natural genera emisiones de 202 a 400 gramos de CO<sub>2</sub> [180] por kWh, equivalente al consumo de un automóvil de gasolina en 1 km, una generación excesiva para un uso regular a lo largo de todo el invierno.

**Eficiencia energética** Hay distintos tipos de caldera con distintas eficiencias energéticas que indican la cantidad de energía útil que son capaces de aprovechar respecto a la energía total consumida. La eficiencia energética en los sistemas de climatización por combustión se mide según el poder calorífico del combustible, representa la energía contenida en el combustible. Esta medida tiene dos límites, el poder calorífico inferior (PCI), el cual mide el calor liberado en la combustión, sin llegar a permitir la condensación del agua de los humos, mientras que el poder calorífico superior (PCS) aprovecha el calor latente del vapor, consiguiendo valores que pueden superar el 100 %. Alineado con el Reglamento ErP 813/2013, se considera el PCS para calcular la eficiencia energética estacional que se empleará en los cálculos del coste operativo [62].

Tipo	Eficiencia media (PCS)	Explicación
Convencional (Atmosférica)	70–85% [177]	Utiliza el aire de la estancia para la combustión y expulsa los gases por la chimenea, lo que conlleva una mayor pérdida de calor.
Estanca (No condensación)	85–95% [177]	Sistema cerrado que capta el aire del exterior, mejorando la seguridad y reduciendo pérdidas energéticas respecto a las convencionales.
Condensación	95–110% [108]	Aprovecha el calor latente de los gases de combustión, condensando el vapor de agua y recuperando esa energía, lo que aumenta la eficiencia y reduce el consumo.

Table 2.1: Comparativa de eficiencia energética según el tipo de caldera. Fuente: [108], [177],

La caldera de condensación es una evolución del diseño tradicional, mejorando la eficiencia por el aprovechamiento del calor latente del vapor de agua contenido en los gases de escape provenientes de la combustión. Este sistema permite alcanzar eficiencias de hasta el 110% en condiciones óptimas, reduciendo el consumo

energético entre un 20% y un 30% [57], respecto a la caldera convencional. La inversión inicial de una caldera de este tipo se sitúa alrededor de los 1.500 €. Las calderas más vendidas en España son:

Modelo	Eficiencia máxima (PCS)	Potencia (kW)	Precio (€)	ACS (L/min)	Tecnología
Vaillant ecoTEC Plus 246/5-5[124]	108%	24	1.609	13	Condensación
Junkers Cerapur Comfort ZWB 24-2C[204]	109%	24	1.260	12	Condensación
Saunier Duval Thema Condens 25[111]	109%	25	1.406	14.6	Condensación
Baxi Platinum Compact ECO 24[82]	105.8%	24	1.059	13.8	Condensación
Ferrolí BlueHelix Pro RRT 28[142]	105%	28	1.583	16,1	Condensación

Table 2.2: Comparativa de modelos de calderas de condensación. Fuente: Elaboración propia

Para elegir la caldera correcta, los parámetros a definir son el tamaño de la vivienda, la demanda de agua caliente sanitaria (ACS), la eficiencia y el consumo. El equilibrio que ofrece esta alternativa entre el coste, la eficiencia y la disponibilidad es muy tentador, pero con los objetivos de descarbonización del sector se observan reemplazos por bombas de calor o alternativas de mayor eficiencia energética.

**Cálculo operativo** Habitualmente, se utiliza una conversión de 1 m<sup>3</sup> de gas equivalente a 11.7 kWh de energía térmica[188], esta equivalencia transforma la demanda energética en el consumo real del combustible basándose en la capacidad de generar calor (poder calorífico). Como se ha fijado una demanda térmica útil dividida en tres climas, primero se calcula la demanda energética real, que es el consumo real del combustible calculado con el PCS y posteriormente, se puede calcular el consumo de combustible, en este caso medido en volumen (m<sup>3</sup>).

### Ecuación 3.

$$E_{\text{final, PCS}} = \frac{Q_{\text{demanda útil}} (kWh)}{\eta_{s,PCS}} \text{ [kWh]}$$

### Ecuación 4.

$$V_{\text{gas}} (m^3) = \frac{E_{\text{final, PCS}}}{11,7 kWh/m^3} \text{ [m}^3\text{]}$$

Realizando una estimación para distintas superficies de vivienda, se obtiene:

Tamaño de la Vivienda	Consumo Anual Aproximado (m <sup>3</sup> de gas)	Equivalente en kWh
Piso pequeño (50 m <sup>2</sup> )	320 – 500	3.744 – 5.850
Piso medio (90 m <sup>2</sup> )	600 – 900	7.020 – 10.530
Vivienda unifamiliar (150 m <sup>2</sup> )	1.000 – 1.500	11.700 – 17.550

Table 2.3: Estimación del consumo anual de gas y su equivalencia energética. Fuente: TotalEnergies y Wolf Energy Guide [49, 41].

Asimismo, si consideramos los consumos para una vivienda de 90 m<sup>2</sup> para mantener las condiciones de confort dependiendo de la zona climática, se obtendrán los siguientes resultados:

Asumiendo el precio del gas natural variante según la tarifa contratada, se escoge el precio del mercado regulado de la Tarifa de Último Recurso (TUR). En España, las viviendas antiguas oscilan en un consumo anual de entre 3.000 y 12.000 kWh. Para ello, se calcula el consumo anual de combustible a partir de la demanda energética por zona climática, considerando la eficiencia energética media de las calderas de condensación 108 % y escogiendo la tarifa regulada TUR 2, con un término fijo de 5,66 €/mes y un término variable de 5,011868 cent./kWh sin IVA.[46].

Zona climática	Consumo anual (m <sup>3</sup> de gas)	Equivalente en kWh	Término fijo anual (con IVA)	Término variable anual (con IVA)	Coste operativo anual total
Zonas cálidas (Sevilla, Valencia, Murcia)	264–528	3.000–6.000	82,20 €	181,93–363,86 €	264,11–446,04 €
Zonas templadas (Madrid, Barcelona)	528–791	6.000–9.000	82,20 €	363,86–545,79 €	446,04 – 627,98 €
Zonas frías (Burgos, León, Teruel)	791–1.055	9.000–12.000	82,20 €	545,79–727,72 €	627,98–809,91 €

Table 2.4: Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con caldera de gas natural (tarifa TUR 2). Fuente: Elaboración propia

Tuvo una gran adopción debido al bajo coste inicial y su facilidad de instalación en viviendas antiguas. Debido al uso de combustibles fósiles y, por consiguiente, la generación de emisiones, representa un impacto medioambiental negativo y desalineado con las nuevas normativas europeas.

## Calderas de gasóleo

La caldera de gasóleo es otra de las opciones más utilizadas en España para zonas rurales o zonas sin acceso a la red de gas natural. La instalación es sencilla y adaptable a edificios antiguos. Combinado con una alta eficiencia para suministrar calefacción y agua caliente, hizo que tuviese una gran adopción inicial que se ve amenazada por las nuevas regulaciones ambientales y mejoras en sostenibilidad.

La combustión de gasóleo se realiza de manera controlada, suministrando la cantidad necesaria de aire en el quemador de alta presión para generar la demanda de calor y abastecer a la circulación de agua en el sistema de calefacción. Su fiabilidad operativa e independencia energética se enfrenta a una eficiencia comprendida entre el 85% y el 97% y a limitaciones en sostenibilidad. Estos factores hacen que otras tecnologías punteras representen una alternativa alineada con los objetivos europeos de descarbonización.

**Eficiencia energética** La eficiencia energética varía según el tipo de caldera y su funcionamiento. A continuación, se presenta un listado de los tipos de caldera con sus respectivas eficiencias:

Tipo	Eficiencia (AFUE)	Descripción
Convencional (atmosférica)[106]	70-80 %	Al expulsar el gas de combustión directamente, pierde el calor aprovechable en la evacuación, generando un mayor consumo de combustible.
Estanca (no condensada)[174]	90-95 %	Mejora la seguridad y eficiencia con un sistema cerrado que extrae aire del exterior para la combustión.
Condensación[174]	95-97 %	Reconduce el calor latente de los gases de combustión para aprovecharlo y aumentar su eficiencia.

Table 2.5: Clasificación de tipos de calderas de gasóleo por eficiencia. Fuente: [106], [174]

Similar a las calderas de gas, el estilo con mayor eficiencia es el de condensación. Esto se debe al aprovechamiento del calor latente y su consecuente aumento de eficiencia. Aun así, el consumo no disminuye lo suficiente como para competir con otras alternativas a largo plazo.

**Cálculo operativo** Para realizar el cálculo operativo se tienen en cuenta los consumos que son directamente dependientes de la eficiencia, el tamaño de la vivienda y las condiciones climáticas donde se sitúa la vivienda.

Zona climática	Consumo anual (L de gasóleo)	Equivalente en kWh	Término fijo anual (con IVA)	Término variable anual (con IVA)	Coste operativo anual total
Zonas cálidas (Sevilla, Valencia, Murcia)	300-610	3.000-6.000	82,20 €	344,4-700,3 €	426,6-782,5 €
Zonas templadas (Madrid, Barcelona)	610-910	6.000-9.000	82,20 €	700,3-1.044,6 €	782,5-1.126,9 €
Zonas frías (Burgos, León, Teruel)	910-1.210	9.000-12.000	82,20 €	1.044,6-1.389,1 €	1.126,9-1.471,3 €

Table 2.6: Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con caldera de gasóleo. Fuente: IDAE [127].

Para realizar el cálculo se utiliza una conversión de 1 litro de gasóleo equivalente a 10,18 kWh de energía térmica[117], siendo este su valor de PCS. El precio medio

del gasóleo en España es de 1,148 €/L[81] y el término fijo anual es de 82,20 €, incluyendo los costes de mantenimiento y tasas de acceso.

El coste operativo anual del sistema de calefacción por calderas de gasóleo es elevado y debido a su impacto ambiental se considera fuera de las tendencias europeas de eficiencia y sostenibilidad. Además, ha de considerarse la inversión inicial, ya que la caldera de gasóleo oscila entre 1.200 y 3.500 € dependiendo de la potencia, el tipo (calefacción o calefacción y ACS) y la tecnología.

Modelo	Eficiencia (%)	Potencia (kW)	Precio (€)	Tecnología
Domusa Evolution EV HFM[97]	103 %	30,2	2.150 €	Condensación
Ferrolí Silent Eco 30 SI Unit[114]	94–98,1 %	25	1.205 €	Estándar (bajo NO <sub>x</sub> )
Domusa Jaka HFS 30[103]	90 %	28,1	830–1.300 €	Estándar (bajo NO <sub>x</sub> )
Lasian Activa 40 A[141]	92 %	27,2	2 034 €	Estándar (bajo NO <sub>x</sub> )
Ferrolí Atlas D 25 SI Unit[113]	90 %	25	1 255 €	Estándar (bajo NO <sub>x</sub> )

Table 2.7: Comparativa de modelos de calderas de gasóleo. Fuente: [97], [114], [103], [141], [113]

## Calderas de biomasa

Estas calderas están alimentadas de material orgánico, tanto vegetal como animal. Esta fuente de energía se considera renovable por la posibilidad de producir y regenerar el combustible de forma mantenida a largo plazo. Los formatos de combustible más utilizados son: pellets de madera, astillas de madera, leña y residuos agrícolas y forestales.

Los beneficios del uso de las calderas de biomasa son la baja huella de carbono, ya que el CO<sub>2</sub> que emite al quemarse ha sido previamente absorbido en el crecimiento de la planta, la reducción de residuo forestal y agrícola, y la reducción de contaminación a la atmósfera proporcionada por los filtros y sistemas de combustión optimizados que minimizan la emisión de partículas y gases.

La eficiencia de los modelos más modernos, su versatilidad y compatibilidad con sistemas de calefacción reciben un espacio de consideración como alternativa de climatización. Aunque requiere un gran espacio de almacenamiento para el combustible, la necesidad de mantenimiento regular y una inversión inicial considerable. También requiere un análisis más detallado para su viabilidad en comparación con las demás tecnologías con mayor adopción en el mercado de los sistemas de climatización.

**Eficiencia energética** La caldera de pellets destaca por su alta eficiencia debido a la baja humedad del combustible (valores del 6–10%) [170], mientras que la leña y las astillas alcanzan el 20–30% de humedad [218]. Además, su densidad energética por su compactación hace que tenga un gran potencial de producción de calor

por volumen. Los sistemas de biomasa incorporan un control de suministro de combustible y de oxígeno que optimiza el proceso y reduce las pérdidas de energía.

Tipo	Eficiencia (%)	Descripción
Caldera de leña[226]	75–90%	Al utilizar leña como combustible, su eficiencia dependerá del tipo de madera, el tamaño y la humedad.
Caldera de astillas[168]	80–92%	Las astillas trituradas sirven de combustible, adaptándose mejor a los sistemas de calefacción centralizados.
Caldera de pellets[200]	90–95%	La opción más eficiente por el bajo contenido en humedad que contienen los pellets, optimizando la combustión de estos.

Table 2.8: Eficiencia de distintos tipos de calderas de biomasa. Fuente: [126], [198], [226], [200], [168]

**Cálculo operativo** Para la conversión de energía y consumo se consideran distintas cantidades de energía térmica extraíble dependiendo del formato de combustible. Se utilizan las siguientes equivalencias:

- 1 kg de pellets = 4,9 kWh de energía térmica [200].
- 1 kg de astillas = 3,5 kWh de energía térmica[168].
- 1 kg de leña = 3,5 kWh de energía térmica [226]

El precio medio del pellet en España es de 0,30–0,45 €/kg [69] y el término fijo anual para el mantenimiento y las tasas de acceso es de 82,20 €.

Zona climática	Consumo anual (kg de pellets)	Equivalente en kWh	Término fijo anual (con IVA)	Término variable anual (con IVA)	Coste operativo anual total
Zonas cálidas (Sevilla, Valencia, Murcia)	680–1.360	3.000–6.000	82,20 €	306–612 €	388–694 €
Zonas templadas (Madrid, Barcelona)	1.360–2.040	6.000–9.000	82,20 €	612–918 €	694–1.001 €
Zonas frías (Burgos, León, Teruel)	2.040–2.720	9.000–12.000	82,20 €	918–1.224 €	1.001–1.307 €

Table 2.9: Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con caldera de biomasa. Fuente: Elaboración propia.

El coste operativo anual de la caldera de biomasa se sitúa entre la caldera de gas natural y la de gasóleo. Esto significa que se tendrán que comparar las eficiencias y el potencial contaminante para declarar la mejor opción.

## 2.2.2 Sistemas de climatización por electricidad

Los sistemas de climatización por electricidad representan una alta eficiencia, instalación sencilla y son compatibles con energías renovables. El funcionamiento de este sistema sustituye el uso de combustibles fósiles, por el uso de electricidad para generar calor, ofreciendo una alternativa versátil y sostenible. Los principales sistemas de climatización son los radiadores eléctricos y los suelos radiantes. Los sistemas de bomba de calor son también sistemas de climatización por electricidad ya que operan exclusivamente con electricidad, aunque la transferencia de calor no sea por resistencia eléctrica; aún así, se dedicará un apartado único para las bombas de calor debido a su extensión.

El rendimiento energético de los sistemas eléctricos no utiliza el poder calorífico ya que no involucra un proceso de combustión, en este caso se emplea el coeficiente de rendimiento (COP) que compara la energía útil que aporta al sistema con la energía eléctrica consumida para generar esa energía en condiciones nominales. Además, también existe el coeficiente de rendimiento estacional (SCOP) que incluye en el cálculo la variación de temperatura exterior, las pérdidas térmicas y el comportamiento del sistema en diferentes condiciones climáticas.

### Radiadores eléctricos

Los radiadores eléctricos emplean electricidad para proporcionar calefacción mediante la conversión de energía eléctrica en calor. El calor, a su vez, se propaga por medio de radiación, la cuál calienta objetos y personas directamente y convección, calentando así el aire.

### Tipos de radiadores eléctricos

- **Resistencia seca:** Mediante una resistencia eléctrica se transfiere el calor directamente al ambiente. Una alternativa económica aunque potencialmente consume más electricidad.
- **Fluido térmico:** El sistema incluye un líquido interno que adquiere temperatura y la distribuye uniformemente, alargando el tiempo que puede mantener la temperatura.
- **Cerámico:** Poseen una placa cerámica que es capaz de retener el calor, liberándolo progresivamente, esto logra un aumento de la eficiencia y una reducción en el consumo eléctrico.
- **Paneles radiantes:** Formado por superficies capaces de emitir calor, este calor se aprovecha para calentar zonas específicas de manera eficiente.

Se realiza una comparación inicial:

Tipo	Eficiencia	Retención de calor	Consumo energético	Coste inicial
Resistencia seca	Media	Baja	Alto	Bajo
Fluido térmico	Alta	Alta	Medio	Medio
Cerámico	Muy alta	Muy alta	Bajo	Alto
Paneles radiantes	Alta	Media	Bajo	Medio

Table 2.10: Comparativa técnica de radiadores eléctricos. Fuente: Elaboración propia

La relevancia de los radiadores eléctricos se centra en la facilidad de instalación sin necesidad de permisos ni instalación profesional que necesita únicamente un enchufe estándar de 230 V y un soporte de pared en caso de necesitar fijarlo, aunque existen otros portátiles con ruedas. Además, su versatilidad y eficiencia cubren las necesidades para regiones con inviernos moderados. Estos radiadores también ofrecen el calor de manera casi instantánea, ya que requieren de poco tiempo para ajustar su temperatura. Los radiadores de resistencia seca son capaces de calentarse en segundos, mientras que el fluido térmico y cerámico tardan más debido a la necesidad de calentar un fluido o material que tarda más en adquirir su temperatura.[71]

Dependiendo del tamaño y la potencia del radiador, puede tardar más o menos en calentar una habitación. Los valores aproximados son de 5 - 10 minutos para elevar la temperatura de una estancia de 10 - 15 m<sup>2</sup> con un radiador pequeño (500 - 1.000 W) y menos de 15 minutos para climatizar un área de 20 - 30 m<sup>2</sup> con un radiador grande (más de 2.000 W) [224].

**Eficiencia energética** Para ajustar aún más el cálculo se analiza la eficiencia de cada sistema para distinguir las aplicaciones y sus posibilidades. El estudio se centra en el consumo energético, la capacidad de distribuir calor y su coste operativo. A su vez, la eficiencia del sistema depende de la eficiencia de convertir calor útil en calor, la capacidad de retención térmica, el método de distribución de calor y la eficiencia considerando las pérdidas térmicas y posibles variaciones ambientales.

Tipo de radiador	Eficiencia de conversión	Retención térmica	Distribución de calor	Pérdidas térmicas
Resistencia seca	100%	Baja	Aire	Altas
Fluido térmico	90%	Alta	Aire distribuido	Medias
Cerámico	85%	Muy alta	Suave	Bajas
Paneles radiantes	80%	Baja	Objetos y personas	Altas

Table 2.11: Eficiencia y comportamiento térmico de los radiadores eléctricos. Fuente: Elaboración propia, Energy [63]

Este análisis superficial refleja el impacto del tipo de sistema que se instala en una vivienda. Como se puede observar, el sistema de calefacción con paneles cerámicos o fluido térmico contiene mayor área de contacto con una retención del calor del 30–40 % superior al radiador con resistencia seca, distribuyendo el calor de manera uniforme, resultando en una mejor eficiencia térmica y un ahorro energético. Un material de alta conductividad puede llegar a reducir el tiempo en alcanzar la temperatura de confort en un 15–20 % gracias a la alta conductividad térmica del material, aunque esto resultará en una pérdida de calor más rápida, siendo hasta el doble de tiempo que tardaría en enfriarse un radiador cerámico en comparación con el radiador de convección. Por ello, es necesario prestar atención a la inercia térmica del material para ajustarlo a las necesidades térmicas de la vivienda [63, 100].

Cada sistema crea unas condiciones del ambiente distintas, esta es la razón por la que un radiador eléctrico requiere que la temperatura del aire esté 2–3 °C más alta para obtener la misma sensación térmica [146]. Por último, el uso del control automatizado o controles climáticos permite una reducción de la demanda energética del 10–15 %, por lo tanto, añadir dispositivos de control de temperatura avanzados puede reducir el consumo [98].

**Cálculo operativo** Para determinar el consumo energético y el coste inicial se pueden realizar dos tipos de análisis, el primero como tecnología auxiliar o de apoyo a otros sistemas de climatización, un cálculo ajustado al uso real de los radiadores eléctricos, para ello se tendrá que tener en cuenta la potencia nominal de los dispositivos (W), el tiempo de uso diario estimado(h/día), el coste medio de la electricidad (0,15 €/kWh)[89], la eficiencia del sistema y las condiciones climáticas que crearán distintas necesidades de calefacción. El segundo estudio trata la tecnología como alternativa individual para cubrir la demanda energética total, como se ha realizado en el resto de apartados. En este estudio se realizará el primer tipo de estudio. Primero, se calculará el consumo diario, luego el coste asociado a este consumo y se asociará a un gasto mensual. Para el funcionamiento medio diario se supondrá un uso de 5 h/día.

Tipo de radiador	Potencia media (W)	Consumo diario (kWh)	Coste mensual (€)
Resistencia seca	2.000	10,0	60
Fluido térmico	1.500	7,5	45
Cerámico	1.000	5,0	30
Paneles radiantes	800	4,0	24

Table 2.12: Consumo y coste mensual estimados (5 h/día, 0,15 €/kWh). Fuente: Elaboración propia.

Como es de esperar, cuanto menor potencia tiene el radiador, menor es el consumo y el coste mensual, sin embargo, se debe tener en cuenta el tiempo de climatización y la eficiencia que afectan a las inercias térmicas de cada dispositivo. Si se enciende un radiador con resistencia seca y otro con fluido térmico durante 5 horas, se obtendrán dos ambientes completamente diferentes debido a su diferencia en potencia y eficiencia. Recalculando con estos parámetros, se obtienen los siguientes valores:

Tipo de radiador	Potencia media (W)	Tiempo de climatización (h)	Consumo diario (kWh)	Coste mensual (€)
Resistencia seca	2 000	1,8	9,6	57,6
Fluido térmico	1 500	2,4	8,67	52,0
Cerámico	1 000	3,6	7,64	45,8
Paneles radiantes	800	5,2	6,50	39,0

Table 2.13: Consumo y coste mensual ajustados por tiempo de funcionamiento y eficiencia. Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que la resistencia seca sigue teniendo el coste operativo más alto debido a la falta de retención de calor, mientras que los radiadores de fluido térmico y cerámicos abaratan el coste operativo mediante la liberación progresiva de calor. Aunque el panel radiante es la alternativa más económica, es útil únicamente para calentar objetos y personas pero pierde efectividad cuando se necesita calentar el aire de toda una habitación.

Por último, se realiza un estudio de algunos ejemplos de radiadores eléctricos disponibles en el mercado que dan perspectiva a la inversión inicial necesaria para realizar la climatización con este sistema en una vivienda de 90 m<sup>2</sup>.

Modelo	Potencia (W)	Tecnología	Superficie cubierta (m <sup>2</sup> )	Precio unitario (€)	Unidades	Precio total (€)
Orbegozo RRE 1510 [178]	1 500	Emisor térmico seco	15	150–180	6	900–1 080
De'Longhi TRRS 1225C Radia S [95]	2 500	Radiador de aceite	25	120–150	4	480–600
Cecotec Ready Warm 6700 [72]	1 500	Convector de cristal	15	90–110	6	540–660
Xiaomi Mi Smart Space Heater S [221]	2 200	Convector eléctrico	22	100–130	4	400–520
Duronic HV101 [99]	2 500	Radiador de mica	25	80–100	4	320–400

Table 2.14: Ejemplos de radiadores eléctricos y coste de inversión para una vivienda de 90 m<sup>2</sup>. Fuente: Fichas técnicas [178, 95, 72, 221, 99].

## Suelos radiantes

El sistema de suelo radiante transmite el calor desde el suelo al ambiente de manera uniforme por medio de radiación térmica. En contraste con los sistemas de calefacción por convección, los sistemas de suelo radiante mejoran la sensación térmica, evitan el aire seco y reducen los cambios de temperatura en la vivienda.

Las características más importantes son:

- Distribución uniforme del calor.
- Mejora en la eficiencia energética de entre 5–15 % gracias a su funcionamiento a temperaturas bajas (30–40 °C), en comparación con los radiadores de convección (60–75 °C).[202]
- Compatibilidad con bombas de calor y aerotermia, mejorando el coeficiente de rendimiento (COP) y su eficiencia.
- Mayor confort térmico y minimiza las pérdidas energéticas al evitar corrientes de aire frío o puntos de calor con falta de distribución.

Los tipos de suelo radiante son:

- **Suelo radiante eléctrico:** Emplea resistencias eléctricas denominadas cables o mallas calefactoras distribuidas a lo largo de la superficie generando calor con la circulación de corriente eléctrica.
- **Suelo radiante por agua:** utiliza caldera o bomba de calor para calentar el agua que circula por tuberías de polietileno.

- **Suelo radiante con materiales de cambio de fase (PCM):** permite liberar la energía acumulada en el material en forma de calor de manera progresiva y estable, incrementando la eficiencia hasta un 10–15 % y logrando una mayor estabilidad térmica [193, 192]. Aunque este sistema innovador ofrece una mejora del comportamiento térmico, todavía se encuentra en fase de investigación.

**Eficiencia energética** La capacidad de distribuir el calor uniformemente es clave para convertirlo en uno de los sistemas más eficientes, operar a bajas temperaturas permite tanto un ahorro energético optimizando el rendimiento de las bombas de calor, llegando a reducciones de consumo energético de 40 - 60 %, como la posibilidad de compatibilizarlo con energías renovables como paneles solares térmicos o placas fotovoltaicas. Cabe resaltar que en edificios bien aislados, la eficiencia del suelo radiante puede superar el 95 %, reduciéndose significativamente si carece de un buen aislamiento.

A continuación, la tabla comparativa de las distintas alternativas de suelo radiante.

Sistema	COP	Ahorro energético	Tiempo de respuesta
Suelo radiante eléctrico	1.0–1.05	5–15 %	Rápido
Suelo radiante hidráulico	3.5–5.0	25–45 %	Medio
Suelo radiante con PCM	4.2–5.0	15–25 % adicional	Más rápido
Suelo radiante + bomba de calor	5.0–6.0	40–60 %	Medio
Suelo radiante + energía solar	6.0–8.0	50–70 %	Medio – Lento

Table 2.15: Comparativa de eficiencia energética entre tecnologías de suelo radiante. Fuente: Artículos [144, 172, 140, 199, 225, 215].

Se puede observar que las combinaciones de suelo radiante con bombas de calor y energía solar son las más eficientes, no es de extrañar porque la mayoría de aplicaciones del suelo de radiante se instalan combinándolo con aerotermia para reducir el consumo energético. Los sistemas que se instalan junto con la energía solar son capaces de reducir el consumo hasta un 70 % siendo la opción destacada para proyectos dedicados a consumo nulo (nZEB).

La integración de materiales cambio de fase (PCM) son capaces de mejorar aún más la eficiencia, aunque todavía están en fase de desarrollo la capacidad de liberar calor progresivamente hace que el sistema no tenga que estar en funcionamiento de manera constante reduciendo considerablemente el consumo.

**Cálculo operativo** Cabe destacar que la instalación del suelo radiante eléctrico es sencilla y barata, pero el ahorro de otros sistemas como el suelo radiante con

aeroterminia junto con la iniciativa europea de impulsar las tecnologías que maximizan la eficiencia provocan una falta de interés en instalar suelo radiante eléctrico a largo plazo. Para comparar las diferentes aplicaciones del suelo radiante se usará una estimación .

**Ecuación 5.**

$$E_{\text{final}} = \frac{Q_{\text{demanda útil}}}{\text{COP}} \text{ [kW h]}$$

**Ecuación 6.**

$$\text{Coste}_{\text{anual}} = E_{\text{final}} \times P_e [\text{€}]$$

A continuación, se presenta una comparativa de inversión para los distintos tipos de suelo radiante donde se ha tomado el precio de la electricidad 0,15 €/kWh [89] y los valores de COP se han ajustado a cada zona climática.

Zona climática	Demanda energética (kWh)	Sistema	COP	Consumo eléctrico (kWh·a)	Coste anual (€)
Zonas cálidas (Sevilla, Valencia, Murcia)	3 000–6 000	Suelo radiante eléctrico	1,0	3 000–6 000	861–1 722
		Suelo radiante + aeroterminia	4,5	667–1 333	191–383
Zonas templadas (Madrid, Barcelona)	6 000–9 000	Suelo radiante eléctrico	1,0	6 000–9 000	1 722–2 583
		Suelo radiante + aeroterminia	4,2	1 429–2 143	411–615
Zonas frías (Burgos, León, Teruel)	9 000–12 000	Suelo radiante eléctrico	1,0	9 000–12 000	2 583–3 444
		Suelo radiante + aeroterminia	3,8	2 368–3 158	680–907

Table 2.16: Consumo y costes operativos anuales estimados por zona climática con suelo radiante. Fuente: IDAE [144, 172]

El coste del suelo radiante eléctrico es superior al hidráulico, debido a su COP y, en consecuencia, su mayor consumo energético. Además, se establece que la inercia térmica del sistema hidráulico es mayor que la del sistema eléctrico, permitiendo mantener una mayor estabilidad en la temperatura de la vivienda. El sistema hidráulico reduce su consumo cerca del 500 % al operar con bomba de calor y puede llegar a ser nulo si se combina con energías renovables.

Adicionalmente, se ha realizado una estimación de coste de instalación y el retorno de la inversión.

Sistema	Coste de instalación (€/m <sup>2</sup> )	Coste Total (90 m <sup>2</sup> ) (€)	Retorno de inversión (ROI)	Vida útil (años)
Suelo radiante eléctrico	40–70	3.600–6.300	5–8	20–30
Suelo radiante hidráulico	50–100	4.500–9.000	8–12	40–50
Suelo radiante con PCM	60–120	5.400–10.800	7–10	40–50
Suelo radiante + bomba de calor	100–180	9.000–16.200	6–10	40–50
Suelo radiante con energía solar	120–200	10.800–18.000	6–9	40–50

Table 2.17: Comparativa de inversión de sistemas de suelo radiante. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, la inversión inicial es mayor pero tanto el retorno de inversión (ROI), como la vida útil del sistema revelan que la mejor opción es la combinación de suelo radiante con la bomba de calor o energía solar. También se pueden utilizar otras alternativas, como energía geotérmica, en el caso de que esté disponible, aunque lo habitual es combinarlo con energía solar ya que la accesibilidad es mucho mayor y el coste de instalación permite ser una tecnología con mayor adopción.

### 2.2.3 Sistemas de bomba de calor

Los sistemas de bombas de calor representan una de las mejores alternativas para sistemas de climatización y producción de agua caliente sanitaria (ACS). Esto se debe al aprovechamiento del ambiente para la generación de calor o frío, reduciendo el consumo eléctrico. El sistema no se centra en la generación de calor como las demás alternativas, sino que transporta el calor desde fuentes como el aire, el agua o el suelo. El sistema se compone por un ciclo termodinámico de compresión y expansión del gas refrigerante que permite la generación de calor, frío y ACS.

La selección del sistema dependerá del clima en la zona de instalación, los requisitos de instalación, los accesos cercanos a fuentes de geotermia o similares y las necesidades de la vivienda.

#### Bombas de calor Aire - Aire

La bomba de calor aire-aire emplea el calor del aire exterior para transferirlo al interior por medio de un ciclo termodinámico. En este ciclo, el refrigerante se evapora al absorber el calor del exterior, se comprime al pasar por el compresor para aumentar su temperatura y presión, se condensa en el intercambiador de calor para transferir el calor al aire del interior, y se expande para regresar a su etapa inicial.

Los tipos más comunes de bomba de calor aire-aire son:

- Sistemas split y multisplit
- Sistema de conductos centralizados
- Sistema inverter o bomba de calor reversible

**Eficiencia energética** La eficiencia energética de las bombas de calor aire-aire se mide con el COP (Coeficiente de rendimiento) y el SEER (Coeficiente de eficiencia estacional). Estos valores dan visibilidad a los efectos de las condiciones climáticas sobre el sistema y permite crear estrategias de mejora del rendimiento. Estos sistemas son unas de las alternativas más eficientes para climatizar edificios.

Para realizar el análisis de la eficiencia, primero se explicarán los factores que afectan a la eficiencia energética:

- **Temperatura exterior:** La eficiencia del sistema disminuye con temperaturas frías ya que la bomba de calor no es capaz de generar calor sino que se realiza un intercambio. En el caso de una menor temperatura exterior, el gas refrigerante del evaporador se evapora con mayor dificultad, por ello cuanto más alta la temperatura, mayor será la eficiencia. Para casos de temperaturas extremas o inviernos muy fríos, es necesario la instalación de bombas de calor con inyección de refrigerante flash o circuitos de doble etapa que puedan trabajar a menor temperatura.
- **Tecnología de compresión:** El compresor tradicional (ON/OFF) alterna entre dos modos, encendido y apagado, creando picos de consumo y menor eficiencia. El sistema Inverter ajusta la potencia de compresión según la demanda térmica, funcionando de forma estable y reduciendo el consumo energético entre un 20% y 25% respecto a sistemas tradicionales. [169]
- **Mantenimiento:** El mantenimiento del sistema es clave para mantener la operación bajo condiciones óptimas. Un filtro de aire sucio u obstrucciones de conductos pueden generar una caída de eficiencia del 25 % ya que la transferencia de energía pierde eficacia y el flujo de aire obtiene resistencia y reduce el rendimiento del sistema. [64]
- **Aislamiento del edificio:** El aislamiento del edificio es clave para reducir la demanda térmica del sistemas, ya que el calor se distribuye de zonas cálidas a zonas frías y las pérdidas térmicas exigen un mayor número de horas trabajadas para conseguir el confort térmico.

- **Distribución del aire:** El sistema de conductos centralizado tiene una distribución homogénea a lo largo de la vivienda, esto ocurre porque se crean zonas cálidas en todas las habitaciones consiguiendo una distribución uniforme, mientras que los sistemas split y multisplit crean zonas calientes que se mezclan con las zonas frías creando una distribución ineficiente.

Se presenta la tabla de eficiencias para diferentes temperaturas, asumiendo un mantenimiento óptimo.

Temperatura exterior	COP
25 °C	5.0 – 6.0
15 °C	4.0 – 5.2
5 °C	3.0 – 4.5
-5 °C	2.5 – 3.5

Table 2.18: Variación del COP según la temperatura exterior. Fuentes: [205, 219]

Sistema	COP (5 °C)	COP (15 °C)	COP (25 °C)
Sistema Split	3.0	3.8	4.5
Sistema Multisplit	3.2	4.0	4.7
Sistema de conductos	3.5	4.2	5.0
Sistema Inverter	4.5	5.2	6.0

Table 2.19: Eficiencia de bomba de calor aire - aire según tipo de sistema y temperatura exterior. Fuentes: [139, 171]

En esta tabla se puede observar el efecto de la temperatura, a la vez que se comprueban los efectos de la tecnología de compresión y la distribución del aire. A mayor temperatura, mayor eficiencia energética proveniente de la facilidad de intercambio de calor. La tecnología de compresión se puede comprobar comparando los valores de sistemas split o multisplit con el sistema de conductos, siendo este último el de mayor rendimiento debido a una distribución energética con mayor eficiencia.

En definitiva, se recomienda obtener un sistema Inverter para reducir los picos de consumo; también se recomienda la instalación de termostatos inteligentes que son capaces de gestionar la climatización de una vivienda por zonas, optimizando su consumo. Además, se debe realizar un mantenimiento regular de los filtros y revisión del sistema.

**Cálculo operativo** Se realizará el cálculo operativo de los tipos más comunes de la bomba de calor aire-aire, incluyendo el consumo energético y el coste operativo mensual para una vivienda de 90 m<sup>2</sup>. La demanda térmica estándar se estima en 100 W/m<sup>2</sup> [176], las horas de funcionamiento se tomarán 6 horas/día, el precio de electricidad se establece en 0,15 €/kWh [89] y los valores de eficiencia energética se tomarán del apartado anterior.

Sistema	COP (5°C)	Consumo diario (kWh)	Coste mensual (€)
Split	3,0	18,0	81,0
Multisplit	3,2	16,9	76,1
Conductos	3,5	15,5	69,3
Inverter	4,5	12,1	54,0

Table 2.20: Consumo y coste mensual estimado para sistemas aire-aire a 5°C exterior. Fuente: Elaboración propia.

Sistema	COP (15°C)	Consumo diario (kWh)	Coste mensual (€)
Split	3,8	14,2	63,9
Multisplit	4,0	13,5	60,8
Conductos	4,2	12,9	58,0
Inverter	5,2	10,5	46,8

Table 2.21: Consumo y coste mensual estimado para sistemas aire-aire a 15°C exterior. Fuente: Elaboración propia.

Sistema	COP (25°C)	Consumo diario (kWh)	Coste mensual (€)
Split	4,5	12,0	54,0
Multisplit	4,7	11,5	51,8
Conductos	5,0	10,8	48,6
Inverter	6,0	9,0	40,5

Table 2.22: Consumo y coste mensual estimado para sistemas aire-aire a 25°C exterior. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se extraen los siguientes valores para resumir la comparación:

Sistema	Coste mensual (€)	Coste anual (€)
Split	54,0 – 81,0	648,0 – 972,0
Multisplit	51,8 – 76,1	621,6 – 913,2
Conductos	48,6 – 69,8	583,2 – 837,6
Inverter	40,5 – 54,4	486,0 – 652,8

Table 2.23: Coste operativo para sistema bomba de calor aire-aire. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, a mayor eficiencia energética, menor consumo energético y menor coste operativo. Además, hay que considerar el coste de la inversión inicial influyendo en la elección final.

Estos cálculos son aproximados para una vivienda de 90 m<sup>2</sup>, donde el consumo aumentaría a mayor superficie. Los sistemas Inverter ofrecen una alternativa de mayor coste inicial, pero con un ahorro energético considerable, mientras que los sistemas de conductos ofrecen una inversión inicial y ahorro intermedios.

Para una vivienda de superficie menor a 70 m<sup>2</sup>, podría ser suficiente un sistema split o multisplit, mientras que para viviendas más grandes se consideraría el sistema de conductos o Inverter dependiendo de los requisitos térmicos de la vivienda. Por ello, se realiza un estudio de la inversión inicial de cada tecnología, relacionándolo con su consumo respectivo para aportar una idea aproximada de la viabilidad del proyecto y comparar más adelante con otro tipo de tecnologías.

## **Bombas de calor aire-agua**

Las bombas de calor aire-agua representan un sistema eficiente y versátil. Su versatilidad proviene de su diferencia con las bombas aire-aire, cuyo funcionamiento es similar, excepto por el método de transferencia de calor al interior. En este caso, se realiza a través de un circuito de agua que permite su integración en suelos radiantes, radiadores a baja temperatura, fan coils e incluso con energías renovables.

Posee una alta eficiencia energética al igual que las bombas de calor aire-aire y tiene una gran capacidad de sustituir las calderas de gas y gasóleo en viviendas existentes, además de reducir el consumo energético de las calderas convencionales entre un 35 y un 55 % [122] sin dejar huella de carbono, al no emitir CO<sub>2</sub>. Las limitaciones de este sistema se encuentran en la bajada del rendimiento en temperaturas exteriores más frías, aunque la eficiencia no baja tanto como en las bombas aire-aire. Su inversión inicial es elevada y, en el caso de usarse también para agua sanitaria, requiere un espacio adicional.

Las principales utilidades de la bomba de calor aire-agua son:

- La calefacción de espacios, mencionada anteriormente.
- La refrigeración en verano (modelo reversible) que permite enfriar el agua para climatización.
- La producción de agua sanitaria para el uso doméstico, que aumenta la independencia de las calderas y es compatible con depósitos de almacenamiento de ACS, lo cual permite aumentar la eficiencia del sistema.

**Eficiencia energética** Antes de realizar el estudio de eficiencia energética, cabe mencionar que los términos de medición de eficiencia son similares a los de la bomba de calor aire-aire, siendo estos el coeficiente de rendimiento (COP) y el factor de rendimiento estacional (SCOP). Ambos indicadores comparan la energía térmica proporcionada con la energía eléctrica consumida.

La temperatura exterior reduce la eficiencia energética de la bomba, al igual que en el caso de la bomba aire-aire. Por ello, se realiza una comparación de los diferentes valores de COP para distintas tecnologías, en este caso sin el uso de refrigerantes:

Temperatura exterior (°C)	COP Aire-Agua	COP Aire-Aire
25	4.5 – 5.5	4.5 – 6.0
15	3.8 – 4.5	3.8 – 5.2
5	2.8 – 3.5	3.0 – 4.5
-5	2.2 – 2.8	2.0 – 3.5

Table 2.24: Comparación de COP entre bombas aire-agua y aire-aire sin refrigerantes especiales. Fuentes: ResearchGate [214], Energy and Buildings, Elsevier [179]

De esta tabla se puede observar la evolución del rango inferior del COP con una evolución similar en ambos sistemas, pero el rendimiento superior experimenta una caída superior en los sistemas de aire-aire a medida que la temperatura exterior disminuye. Esto indica que los sistemas más simples, y por lo tanto con menor rendimiento, de ambas tecnologías operan a COP similares, pero la bomba de calor aire-agua resiste mejor el frío gracias a la mayor capacidad térmica del agua respecto al aire, obteniendo una temperatura más estable al almacenar energía térmica en el circuito.

En aplicaciones en climas fríos, se recomienda:

- El uso de refrigerantes con mayor capacidad térmica (como R290 o R32).
- La implementación de compresores de doble etapa con inyección de vapor (tecnología EVI), que pueden aumentar el COP hasta un 20% a bajas temperaturas [206].
- La adición de intercambiadores de calor eficientes que reduzcan las pérdidas de eficiencia energética.

El resultado estimado de incorporar estas soluciones puede observarse en la siguiente tabla:

Temp. ext. (°C)	COP Convencional	COP R290	COP EVI	COP R32
25	4.5 – 5.5	5.2 – 6.0	5.0 – 5.8	4.8 – 5.5
15	3.8 – 4.5	4.5 – 5.2	4.2 – 4.8	4.0 – 4.6
5	2.8 – 3.5	3.5 – 4.2	3.2 – 4.0	3.0 – 3.8
-5	2.2 – 2.8	3.0 – 3.5	2.8 – 3.5	2.5 – 3.2

Table 2.25: COP en bombas de calor aire-agua. Fuentes: IJES [223], Sciencedirect [220], [206]

Como se puede observar, la tecnología EVI y el uso del refrigerante R290 presentan un mejor rendimiento a temperaturas bajas y un COP más estable. El uso del refrigerante R290, además de ofrecer una mayor eficiencia energética en todo el rango de temperaturas, presenta un menor impacto medioambiental.

En función de los requisitos térmicos de la vivienda y las capacidades de inversión del usuario, se proporcionará en el siguiente apartado un resumen de todas las posibilidades.

**Cálculo operativo** El coste operativo va ligado a las medidas de eficiencia energética (COP), ya que a menor consumo energético, menor coste anual. Aun así, hay que considerar la inversión inicial y combinarla con el consumo diario para identificar el flujo de costes de la tecnología. Se realiza un estudio de las tecnologías más utilizadas de la bomba de calor aire-agua. La demanda térmica estándar se estima en  $100 \text{ W/m}^2$  [176], las horas de funcionamiento se tomarán 6 horas/día, el precio de electricidad se establece en  $0,15 \text{ €/kWh}$  [89] y los valores de eficiencia energética se tomarán del apartado anterior.

Sistema	COP (15°C)	Consumo diario (kWh)	Coste mensual (€)	Coste anual (€)	Inversión inicial aproximada (€)
Convencional	3.8	14.21	63.93	767.16	6 500
EVI (Inyección de vapor)	4.2	12.86	57.87	694.44	8 400
Refrigerante R32	4.0	13.50	60.75	729.00	7 800
Refrigerante R290	4.5	12.00	54.00	648.00	9 200

Table 2.26: Consumo y costes operativos de bomba de calor aire-agua. Fuentes: Gasfriocalor [116], Vaillant [213], LG España [143], Flexpro Industry [115]

De la tabla se puede observar que las bombas de refrigerante R290 (propano) son la alternativa con mayor eficiencia energética, gracias al refrigerante, menor consumo energético y menor coste operativo, mientras que el sistema convencional puede recomendarse para espacios con baja demanda térmica y preferencia de una menor inversión inicial.

Alternativamente, existen otras opciones como las bombas de calor con compresor Scroll, que aportan una mayor eficiencia energética, además de reducir el ruido y aumentar su rendimiento en temperaturas más bajas. El compresor rotativo es otra alternativa más económica, diseñada para climas templados. Por último, se puede combinar la bomba de calor con otras soluciones. Algunos ejemplos son:

- **Bomba de calor con ciclo de subenfriamiento:** Al incorporar un ciclo de subenfriamiento se obtiene una mejora en la eficiencia recuperando el calor latente en el ciclo termodinámico, resultando en un aumento del 5–10 % del COP. [94]
- **Bomba de calor híbrida:** La combinación de la bomba de calor con una caldera de gas permite el funcionamiento optimizado a temperaturas muy bajas, activando la caldera solo en caso de que la bomba se encuentre en una pérdida de eficiencia.
- **Bomba de calor con tecnología de recuperación de energía:** Esta combinación se basa en el aprovechamiento del calor residual de otros procesos. Esta tecnología se recomienda para grandes edificios y áreas industriales.
- **Bomba de calor con tanque de estratificación:** El tanque de estratificación almacena el calor para optimizar el uso de energía, recogiendo la energía térmica en las etapas de menor demanda y suministrándola cuando esta aumenta. Esta técnica aumenta la eficiencia del suelo radiante y ACS, ya que el sistema reduce los arranques y paradas, alargando la vida útil del sistema.

## Aeroterminia

La tecnología en auge de los sistemas de climatización es la aeroterminia, una tecnología capaz de generar calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS).

El funcionamiento de la aeroterminia tiene el mismo principio que las bombas de calor aire-agua, donde se extrae el calor del aire exterior y un refrigerante absorbe el calor para transportarlo y transmitirlo al aire interior de la vivienda. Cabe una confusión entre las bombas de calor aire-agua y la aeroterminia, ya que su principio de funcionalidad es muy similar. La diferencia se encuentra en sus aplicaciones: la aeroterminia genera calefacción, refrigeración y ACS a partir de bombas de alta eficiencia, mientras que la bomba de calor aire-agua forma parte de ese sistema pero solo puede transferir el calor a un circuito de agua. En el caso de necesitar refrigerar, tendría que ser reversible, y sería el caso más similar a la aeroterminia.

El sistema ofrece un alto rendimiento y una alternativa de descarbonización del sector residencial. En el caso de sustituir todas las calderas tradicionales por

bombas de calor, se reduciría hasta un 50 % el número de emisiones de CO<sub>2</sub>, basado en datos de la Agencia Internacional de la Energía [136]. Se considera una energía renovable, siempre que la eficiencia supere el mínimo establecido en la Directiva Europea 2009/28/CE [184] (SCOP mayor a 2.875 en Europa climáticamente templada), es compatible con numerosas fuentes de energía renovable, a menudo combinadas con placas fotovoltaicas que facilitan el autoconsumo. Aun sin la colaboración de estas energías, la aerotermia representa una reducción del consumo energético del 70 % en comparación con las calderas convencionales, las cuales requieren un mantenimiento debido a la combustión, mientras que la aerotermia requiere un menor coste [80].

Además, este sistema se adapta a climas variados sin perder demasiada eficiencia, la cual utiliza los mismos coeficientes que las bombas de calor aire-agua, siendo estos el coeficiente de rendimiento (COP) y el coeficiente de rendimiento estacional (SCOP).

En España, el Código Técnico de Edificación (CTE) y la certificación energética de edificios (CEE) recomiendan el uso de la aerotermia en reformas y obra nueva. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [21] se aleja de los combustibles fósiles, buscando opciones más eficientes y con menor huella de carbono, haciendo hueco para tecnologías innovadoras como la aerotermia, con una predicción de adopción del 40 % de las viviendas en la Unión Europea en 2050. Estas medidas apuntan a una gran reducción de las emisiones y el uso de combustibles fósiles.

**Eficiencia energética** La capacidad de suministrar mayor energía térmica de la disponible del exterior ( $COP > 1$ ), hace que la tecnología sea sostenible y rentable para climatizar edificios de viviendas, pudiendo suministrar agua caliente, fría y sanitaria con gran adaptabilidad a diferentes sistemas como el suelo radiante, fan-coils, radiadores de baja temperatura y agua sanitaria caliente (ACS).

Los factores que influyen en la eficiencia energética son la temperatura exterior, como en el caso de las bombas de calor. Un clima frío limita la cantidad de energía térmica extraíble y reduce la eficiencia. Para ello, se incorpora el uso de inyección de vapor (EVI) y de los refrigerantes R290 y R32, como en las bombas de calor aire-agua.

La temperatura de impulsión del agua es decisiva para los niveles de eficiencia, ya que a menor temperatura de impulsión, mayor eficiencia energética existirá en el sistema, porque la demanda térmica disminuye y con ello sus pérdidas. Es por esto que el suelo radiante, cuya temperatura de impulsión es de 35°C, tiene un COP mayor que el radiador tradicional cuya temperatura de impulsión es de 60°C.

Otros factores como el aislamiento del edificio, el uso de energías renovables y

un control inteligente de los sistemas de climatización pueden reducir significativamente el consumo energético.

Sistema	Temperatura de impulsión	COP (-5 °C)	COP (5 °C)	COP (15 °C)
Aeroterminia + Suelo radiante	35 °C	4.2	4.8	5.5
Aeroterminia + Radiador baja temperatura	45 °C	3.5	4.0	4.5
Aeroterminia + Radiador convencional	60 °C	2.5	3.0	3.5

Table 2.27: Coeficiente de rendimiento (COP) según sistema de distribución y temperatura exterior.

Como se puede observar, cuanto menor sea la temperatura de impulsión, mayor será la eficiencia. Además, cuanto menor sea la temperatura exterior, menor será la eficiencia.

**Cálculo operativo** Para realizar el cálculo operativo se analizará una vivienda de 90 m<sup>2</sup>, con una temperatura exterior de 15 °C y una demanda térmica anual aproximada de demanda media de 114,4 kWh/m<sup>2</sup>·año para la zona continental, 88,2 kWh/m<sup>2</sup>·año en la zona del Atlántico norte y 44,1 kWh/m<sup>2</sup>·año, incluyendo calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) [60]. Por lo tanto, se establecen como demandas energéticas para la comparación de 3.000 kWh/año a 6.000 kWh/año en zonas cálidas, hasta 9.000 kWh/año en zonas templadas y hasta 12.000 kWh/año en zonas frías.

Zona climática	Demanda térmica anual (kWh)	COP	Consumo eléctrico (kWh)	Coste operativo anual (€)
Zonas cálidas	3 000 – 6 000	4.5	667 – 1333	100 – 133
Zonas templadas	6 000 – 9 000	4.0	1 500 – 2 250	225 – 338
Zonas frías	9 000 – 12 000	3.5	2 571 – 3 429	386 – 514

Table 2.28: Consumo eléctrico y coste operativo anual estimado por zona climática para una vivienda de 90 m<sup>2</sup>. Fuente de demandas térmicas: [60].

El coeficiente de rendimiento relaciona kWh térmicos generados con kWh eléctricos consumidos. Esta cifra depende de la temperatura ambiente y las condiciones de operación del sistema. El funcionamiento óptimo se da en ambientes cálidos, ya que una mayor temperatura exterior facilita la extracción de calor y mejora el rendimiento del ciclo termodinámico.

Para aumentar el COP y, en consecuencia, el rendimiento general del sistema, se recomienda:

- Incorporar energías renovables como la fotovoltaica (reduce consumo hasta un 50 %) [145].
- Instalar acumuladores térmicos para almacenar calor en horas solares y suministrarlo en horas punta.
- Usar suelo radiante, que opera a menor temperatura (35–45 °C), mejorando el COP entre un 10–15 % [112].
- Mejorar el aislamiento térmico de la vivienda, evitando pérdidas térmicas.
- Realizar un mantenimiento periódico de los sistemas de climatización.

## Geotermia

La geotermia es una tecnología renovable que utiliza el calor del subsuelo para generar calefacción y refrigeración. La energía almacenada en el subsuelo representa una fuente de energía estable con una temperatura consistente gracias a la energía desprendida por el núcleo de la Tierra. La geotermia tiene diferentes usos: es posible generar electricidad por medio de turbinas accionadas por el vapor que emerge de las zonas con mayor actividad geotérmica; también puede canalizarse una red de climatización urbana que suministre calefacción y refrigeración a edificios; e incluso, en climas muy fríos con abundantes nieves, se puede utilizar para mantener las carreteras secas y seguras.

En el caso del uso para climatización de residencias se emplea la geotermia de baja entalpía. Esta extrae calor de las capas superficiales del suelo, con profundidades desde 10 hasta 200 metros dependiendo de los requisitos de climatización y el tipo de instalación geotérmica, a diferencia de los sistemas de alta entalpía donde se emplean fuentes de calor con mayor temperatura (superior a 150 °C) para la generación eléctrica.

La eficiencia de la geotermia es alta debido a la constancia de la temperatura del terreno con una oscilación de entre 10 y 20 °C. El circuito de calefacción captura el calor del suelo con tuberías enterradas que albergan un fluido que facilita la transmisión de energía térmica (agua con glicol o refrigerantes). Este fluido se transfiere a la bomba de calor geotérmica, donde se eleva la temperatura por medio de la compresión del fluido y, una vez caliente, se distribuye por la instalación. En el caso de refrigeración, el proceso se realiza a la inversa.

El potencial de la geotermia se hace evidente en las zonas de mayor energía geotérmica. Por ejemplo, en Islandia, más del 90 % de los hogares usan calefacción alimentada por geotermia, que junto con el resto de aplicaciones geotérmicas representa el 66 % del consumo de energía primaria, eliminando una gran parte del consumo de combustibles fósiles y su emisión de CO<sub>2</sub> asociada [110, 148]. Estos

proyectos son la prueba de los beneficios de la geotermia y el impacto que puede llegar a tener, aunque primero hay que analizar la eficiencia y el cálculo operativo para comprobar bajo qué circunstancias puede salir rentable.

**Eficiencia energética** Los sistemas geotérmicos dependen de la disponibilidad de energía geotérmica y la accesibilidad de esta. Por ello, los factores que mayor influencia tienen sobre la eficiencia energética son:

- **Conductividad térmica:** Cuanto mayor sea la conductividad del suelo, mejor será la transferencia del calor y aumentará la eficiencia. Los suelos de mayor conductividad suelen estar formados de rocas o tener un alto nivel de humedad.
- **Temperatura del suelo:** La estabilidad de la temperatura del subsuelo es esencial para mantener un rendimiento óptimo de la bomba de calor, aún más importante cuando la instalación se encuentra en un clima frío.
- **Diseño del intercambiador de calor subterráneo:** El diseño puede ser horizontal, una opción económica con mayor requisito de superficie y vertical, aunque es más cara, obtiene una mayor eficiencia.
- **Temperatura del fluido del circuito de distribución:** Como se ha mencionado en otros sistemas con intercambiador de calor, cuanto menor sea la demanda térmica, mayor será la eficiencia por la reducción de pérdidas. Por ello, aplicaciones como el suelo radiante son más eficientes que los radiadores tradicionales.

Condiciones de operación	COP (calefacción)	COP (refrigeración)
Geotermia con intercambiador horizontal	3.5 – 4.5	4.0 – 5.0
Geotermia con intercambiador vertical	4.0 – 5.5	4.5 – 6.0
Sistemas con aguas subterráneas	5.0 – 6.5	5.5 – 7.0

Table 2.29: Coeficiente de rendimiento según tipo de captación geotérmica. Fuentes: Energy and Buildings [123], Smart Buildings [203], Energy and Buildings [92].

Estos resultados permiten comprobar la efectividad de cada sistema, como se ha mencionado previamente, un intercambiador horizontal tiene acceso a la parte más superficial donde se acumula menos energía; el intercambiador vertical permite un intercambio más eficiente y, en el caso de tener acceso a pozos subterráneos, el intercambio será optimizado. La eficiencia energética de los sistemas geotérmicos

de baja entalpía se encuentra en un rango promedio de COP de 3,8 a 4,5 para calefacción y 4,2 a 5,5 para refrigeración, valores que dependerán del diseño del intercambiador, el control del sistema, el tipo de bombas y las condiciones geológicas y climáticas del proyecto.

El efecto de la profundidad se ha nombrado previamente, la siguiente tabla muestra la diferencia de eficiencia por profundidad de terreno.

Profundidad del pozo	COP promedio
10 – 20 metros	3.2 – 4.0
30 – 50 metros	3.5 – 5.0
Más de 80 metros	4.5 – 5.5

Table 2.30: COP promedio según profundidad de perforación geotérmica. Fuentes: Energy and Buildings [68]

, Issmge [66], Energies MDPI [147].

Se comprueba la hipótesis establecida previamente, a mayor profundidad, mayor eficiencia, gracias a la estabilidad y la subida de la temperatura del terreno por cercanía al núcleo de la Tierra. Además, también es interesante observar el efecto del clima, ya que en climas fríos, las temperaturas del suelo se reducen gradualmente alrededor de 5°C, creando una bajada estimada del COP de 0.006–0.015 por año [167] [56].

Condiciones climáticas	COP (calefacción)
Clima frío	3.0 – 4.0
Clima templado	3.5 – 4,5
Clima cálido	4.0 – 5.3

Table 2.31: Rendimiento energético de la geotermia según clima. Fuente: Elaboración propia, [175].

Por último, cabe mencionar la incorporación de la bomba de calor inverter en los sistemas de geotermia, al ajustar la potencia dependiendo de la demanda térmica se aumenta el rendimiento del sistema con una reducción del consumo de energía primaria del 10–20 % y un aumento del COP de hasta el 30 % en comparación con los sistemas convencionales. Estas son algunas de las medidas que también pueden ayudar a optimizar el sistema [78]. Se recomienda instalar un intercambiador vertical en climas fríos para mantener una eficiencia considerable, además de incluir la tecnología inverter, combinándolo con suelo radiante y un almacenamiento térmico que aporte estabilidad.

**Cálculo operativo** La geotermia es una tecnología que requiere una instalación elaborada que ocupa espacio y personal cualificado, por ello se realiza un estudio

de los costes asociados. La inversión inicial se refiere al coste de la bomba de calor, el sistema de captación, el sistema de distribución y otros componentes como el acumulador de ACS, sistemas de regulación de temperatura, la mano de obra y la licencia para poner en marcha el proyecto, en total se estima un coste total de 15.000 - 25.000 € [118]. Se analizan a continuación los principales componentes del coste total:

- **Bombas de calor:** Depende de la potencia necesaria para el proyecto rondando los 200–300 € por kW [208]. Para una bomba pequeña de 5 a 9 kW, la instalación y calibración tienen un coste aproximado de 4.000 €, una bomba mediana sube a 8.000 € y una grande es aproximadamente 12.000 €.
- **Sistemas de captación:** Los principales sistemas son horizontales, en el cual los requisitos de superficie rondan los 500 m<sup>2</sup> para una vivienda de 200 m<sup>2</sup> con una demanda energética de 10 kW, aproximadamente entre 7 - 9 € por m<sup>2</sup> de captación horizontal. Mientras que una instalación vertical es más compleja por la profundidad de la perforación (20-90 m), por lo tanto, su precio le acompaña, aproximadamente costando 30–45 euros por metro perforado [83], necesitando entre 2 y 4 perforaciones para una vivienda unifamiliar común.
- **Sistemas de distribución:**
  - Suelo radiante: La opción más eficiente con un coste promedio de instalación de 50-70 €/m<sup>2</sup>.
  - Radiador convencional: Habitualmente de aluminio o chapa con un coste de 30–50 €/unidad.
  - Radiador baja temperatura: 250–500 €/unidad
  - Split/multisplit: 350–700 €/unidad
- **Otros componentes:** El acumulador de ACS para suministrar a la vivienda de agua caliente sanitaria además de calefacción y refrigeración tiene un precio de 800 - 1.300 € por una capacidad de 400 litros. Un sistema de regulación que permita manejar la temperatura del sistema de manera eficiente (800 €). Por último, los costes de mano de obra y licencias se aproximan a 3000 € [149, 211].

Tipo de sistema	Coste unitario	Cantidad	Coste total
Suelo radiante	60 €/m <sup>2</sup>	90 m <sup>2</sup>	5.400 €
Radiador convencional	40 €/unidad	6 unidades	240 €
Radiador de baja temperatura	400 €/unidad	6 unidades	2.400 €
Split / Multisplit	550 €/unidad	6 unidades	3.300 €

Table 2.32: Coste del sistema de distribución en vivienda tipo. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de sistema	COP	Consumo eléctrico (kWh)	Coste anual (€)
Suelo radiante	4.5	2.000	400
Radiador convencional	3.0	3.000	600
Radiador de baja temperatura	4.0	2.250	450
Split / Multisplit	3.5	2.571	514,3

Table 2.33: Consumo y costes operativos anuales según sistema de distribución. Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, el proyecto representa una inversión total de 20.000 € como mínimo, sacrificando la eficiencia con radiadores convencionales y en un proyecto habitual resultaría una inversión total de 25.000 - 30.000 €. Cabe mencionar que aunque existen infinidad de posibilidades, las tecnologías más eficientes siempre se deberán combinar con suelo radiante y otras alternativas que permitan explotar la eficiencia. Por ello, para calcular el coste de instalación, también se resuelve el coste operativo anual de esta tecnología usando un COP promedio de 4,5, un consumo eléctrico anual de 9.000 kWh/año, resultando en un consumo anual de 400 € [107].

## 2.3 Comparativa final

Una vez se ha realizado el estudio individual de cada alternativa, es necesario recopilar toda la información y ordenarla de tal manera que sea sencilla la interpretación. A continuación, se realiza una comparación de todos los datos técnicos y económicos mencionados previamente considerando el desempeño de cada una de las tecnologías. Se incluyen los principales indicadores técnicos y económicos para comparar la viabilidad e impacto de cada proyecto.

Sistema	Inversión inicial (€)	Consumo anual (kWh)	Coste anual (€)	Eficiencia (%)	Ahorro anual (€)	ROI
Caldera de gas natural	1.600 - 2.500	2.777,78 - 11.111,11	264,11 - 809,91	85 - 110	-	-
Caldera de gasóleo	1.300 - 2.500	3.157 - 12.351	344,4 - 1.389,1	90 - 97	-80,29 - -761,12	N/D
Caldera de biomasa (pellets)	3.758	3.000 - 12.000	388 - 1.307	90 - 95	239,98	15,66
Radiador eléctrico (resistencia seca)	900 - 1.080	3.504	691,2	100	-63,22	N/D
Radiador eléctrico (Fluido térmico)	480 - 600	3.164,55	624	90	66,31	9,05
Radiador eléctrico (Cerámico)	540 - 660	12.788,6	549,6	85	78,38	7,66
Suelo radiante eléctrico	3.600 - 6.300	3.000 - 12.000	861 - 3.444	100 - 105	-233,02 - -2.816,02	N/D
Suelo radiante hidráulico	4.500 - 9.000	750 - 3.000	191 - 907	350 - 500	436,98	12,44
Sistemas Split	1.169,70	4.380 - 6.570	648 - 972	300 - 450	-20,02	N/D
Sistemas Multisplit	1.500	4.197,5 - 6.168,5	621,6 - 913,2	320 - 470	6,38	235,13
Sistema de conductos	5.000	3.942 - 5.657,5	583,2 - 837,6	350 - 500	44,78	111,64
Sistema Inverter	1.500	3.285 - 4.416,5	486 - 652,8	450 - 600	141,98	10,56
Bomba de calor aire-agua convencional	6.500	5.186,65	766,8	380	43,11	150,78
Bomba de calor aire-agua con EVI	8.400	4.693,9	696	420	113,91	73,74
Bomba de calor aire-agua con R32	7.800	4.927,5	729,6	400	80,31	97,12
Bomba de calor aire-agua con R290	9.200	4.380	648	450	161,91	56,82
Aeroterminia con suelo radiante	13.000 - 22.000	667 - 3.429	100 - 514	420 - 550	559,91	23,22
Geoterminia con suelo radiante	23.400	2.000	400	450	659,91	35,46

Table 2.34: Tabla comparativa de sistemas de climatización. Fuente: Elaboración propia.

Los datos muestran la correlación entre la inversión y el ahorro energético, donde las tecnologías con mayor eficiencia como la aeroterminia y la geoterminia también representan las opciones de mayor inversión inicial. Por otro lado, los sistemas con mayor consumo energético suponen una inversión inicial menor, aunque se convierten en un gasto añadido a largo plazo. Cabe mencionar que las tecnologías más novedosas como la aeroterminia o la geoterminia, aunque en este estudio se analice la posibilidad de combinarlas con diferentes sistemas de distribución, en la realidad, se suelen instalar, en el caso de la aeroterminia, la unidad con ACS incluido y suelo radiante. La razón es simple: un sistema eficiente no debe colocarse con otro sistema que lo limite, porque anula su eficiencia, como hemos podido observar en

los casos anteriores. Es importante mencionar que a la hora de realizar el estudio se ha escogido una demanda energética personalizada a cada tecnología, por ello, en la comparativa final, las tecnologías eléctricas obtienen un ROI menor, de esta manera, la comparativa final sirve para unificar todos los datos del estudio. El uso cada vez más extendido del suelo radiante es la prueba de la confortabilidad de cada sistema de distribución; aunque en el papel los números sean similares, la realidad es que al colocar el suelo radiante, la distribución del calor y la relación de este con el cuerpo humano hacen que la sensación térmica sea homogénea, mientras que unidades como los radiadores convencionales o el Split ofrecen menor confortabilidad. Por ello, se ha creado una tabla con el resultado conjunto de varios estudios que analizan el confort de cada tecnología, evaluando con la opinión personal cada apartado con una puntuación de 1 a 5.

Sistema	Homogeneidad térmica	Tiempo de respuesta	Ruido	Estabilidad	Confort	Nota final
Suelo radiante	5	2	5	5	5	4.9
Radiadores a baja temperatura	4	3	5	4	4	4.2
Fan-coils	3	4	3	2	4	3.7
Radiadores convencionales	2	4	3	2	2	3.2
Radiadores eléctricos	1	4	3	1	2	2.4

Table 2.35: Evaluación del confort térmico percibido por sistema de climatización (escala 1–5).

El retorno de inversión es otro punto a comentar, donde opciones aparentemente poco recomendadas según el análisis, aparecen con un ROI por debajo de los 3 años. Este es el caso de los radiadores eléctricos, que suponen una inversión inicial pequeña comparada con el ahorro que significan. Esto es porque no son sistemas creados para la climatización de toda la vivienda. Aun así, los números no dominan la decisión, ya que el confort técnico que ofrecen es muy bajo, terminando en una vivienda mal climatizada y con gastos extras para compensar esa falta.

Por otro lado, las tecnologías más prometedoras, la aerotermia y la geotermia, demuestran un ROI mayor al esperado. La media de retorno de inversión de un proyecto de aerotermia se presenta entre 8 y 10 años públicamente. Este dato no es realista porque:

- Los cálculos de este estudio incluyen una vivienda antigua de 90 m<sup>2</sup> con déficit de aislamiento térmico y baja calificación energética. Cuanto mayor sea la vivienda, menor será el tiempo en recuperar la inversión, ya que la inversión inicial no conlleva un crecimiento lineal respecto al tamaño de la vivienda, sino que la mayoría de componentes son independientes al tamaño.

- Además, cuanto mayor sea la superficie, mayor será el ahorro energético porque sube la demanda térmica.
- No se tienen en cuenta ninguna de las subvenciones que se ofrecen por instalar sistemas de energía limpia.
- Este estudio no tiene en cuenta factores como el confort térmico a la hora de realizar el cálculo de la demanda térmica. Cuando aumenta el confort térmico de una tecnología, automáticamente disminuye su demanda energética, independientemente de su eficiencia.

También se ha comprobado la razón por la que los sistemas no rentables están cayendo en desuso. Hay un claro movimiento hacia la sostenibilidad y el ahorro energético que hace que estas tecnologías pierdan terreno. Por ello, una menor eficiencia, la emisión de gases o un alto coste operativo son factores decisivos para el futuro de una tecnología.

Las calderas de gas natural, gasóleo y biomasa son alternativas que se considerarán en el futuro únicamente para casos en los que la aerotermia y otras soluciones eficientes no sean posibles.

## 2.4 Marco político y subvenciones

Los objetivos de las políticas europeas y nacionales son descarbonizar el parque de viviendas con una transición energética que promueve la climatización eficiente e incorpora el uso de energías renovables como la aerotermia y la geotermia. El marco político también se encarga de promover la adopción de estas nuevas tecnologías y facilitar la implementación con actualizaciones de normativas limitando las emisiones o incorporando nuevos límites de eficiencias para reformas y obra nueva, además, se presentan subvenciones y ayudas desde proyectos europeos y nacionales que permiten la mejor adopción de esta evolución hacia la eficiencia. Compromisos como el Pacto Verde Europeo, el Reglamento sobre el clima de la UE o la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios impulsan a los miembros de la Unión Europea a perseguir edificaciones con un consumo energético nulo (NZEB), en el caso de España, la actualización del Código Técnico de la Edificación (CTE) y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima.

A continuación, se presenta un análisis del marco político español, las ayudas disponibles para facilitar la mejora de los sistemas de climatización y un resumen de las oportunidades que se ofrecen a particulares y técnicos.

### 2.4.1 Marco político europeo

La Unión Europea tiene una estructura clara de transición liderada por la eficiencia energética, la descarbonización y las energías renovables. Estas acciones se ven reflejadas en el marco político de la siguiente manera:

- **Directiva 2010/31/UE:** Esta directiva fue revisada en 2018 y 2023, trata la eficiencia energética de los edificios y obliga a los edificios nuevos a cumplir con las directrices de consumo casi nulo (nZEB), es decir, necesitarán una calificación energética alta, obtenida con gran parte de la demanda cubierta por energías renovables y uso de sistemas de climatización eficiente como las bombas de calor, aerotermia o geotermia. Para los edificios ya construidos también se establece el requisito de la definición de estrategias de rehabilitación energética a largo plazo con la obligación de incluir el cumplimiento de los indicadores de energía primaria no renovable y de emisiones CO<sub>2</sub>. La revisión de 2023 añade un calendario con la eliminación progresiva del uso de combustibles fósiles para calefacción en viviendas e introduce una etiqueta digital obligatoria para los edificios con la premisa de realizar unas renovaciones mínimas dependiendo de la clasificación energética a la que se pertenezca [181, 182, 84].
- **Reglamento 2021/1119:** La Ley del Clima Europea establece el objetivo de la neutralidad climática en la Unión Europea para 2050 con una reducción del 55% de emisiones de gases de efecto invernadero para 2030, tomando los datos de inicio en 1990. Se identifica como prioridad la climatización del sector residencial, al representar el 40% del consumo energético total se comienza por políticas energéticas que se alineen con esta meta [183].
- **Plan REPowerEU:** Fue creado en 2022 para crear un plan de acción con una estrategia para aplacar la crisis energética que surgió a partir de la guerra de Ucrania por la dependencia de los países europeos al gas ruso. Para promover la independencia energética primero se diversifican las fuentes de energía, luego se reduce el consumo de energía fósil aumentando la eficiencia y se termina con la implementación total de las energías renovables. Las metas de este plan son la instalación de bombas de calor (2022-2027) con un hito de 30 millones para 2030, se suspenderán las ayudas y subvenciones para calderas de gas fósil a partir de 2025 y se creará una red de climatización renovable (district heating) que además aproveche el calor residual de distintos puntos de calor. Para conseguir estos objetivos se dota de una ayuda dentro del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (MRR) que ofrece una guía para las ayudas nacionales como NextGenerationEU [86, 85].

## 2.4.2 Marco regulador en España

Siguiendo los pasos de la Unión Europea, España forma una estrategia energética para ajustarse a los nuevos requisitos formada por normativas técnicas, planes estratégicos y programas de financiación pública que plantean el proceso de descarbonización del sector inmobiliario eliminando el uso de combustibles fósiles. Para analizar las herramientas del estado se presenta una lista de las medidas que afectan a la eficiencia energética.

- **Documento Básico HE (Código Técnico de la Edificación):** Con el Real Decreto 732/2019 se incluye la actualización del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE), el apartado HE4 establece una contribución mínima de energía renovable destinada para ACS, del 60% de la demanda de ACS para obra nueva y rehabilitaciones íntegras. El apartado HE0 y HE1 también limita el consumo de energía primaria no renovable y demanda energética global impulsando la elección de instalar tecnologías eficientes como la aerotermia o la geotermia [153].
- **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2021 - 2030):** En este documento se detalla la planificación energética que conlleva una transformación energética con objetivos para la renovación energética de al menos 1,2 millones de viviendas antes de 2030, una reducción del 39,6% (respecto a 2015) de energía primaria no renovable destinada al sector residencial, la sustitución de los sistemas de climatización que usen combustibles fósiles por bombas de calor con el hito de 1 millón de nuevas instalaciones renovables [161].
- **ERESEE 2020:** La Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación detalla los pasos a seguir para renovar el parque residencial con el objetivo de ser un parque neutro en carbono para 2050, priorizando rehabilitaciones integrales que incluyan mejoras de aislamiento y sistemas térmicos, además de energías renovables térmicas y evaluaciones de coste-beneficio para la instalación de las bombas de calor, aerotermia y geotermia en edificios ya construidos [160].

## 2.4.3 Subvenciones y ayudas

Las subvenciones y ayudas son otra medida de catalizador para potenciar la transición energética. A continuación, se presenta la lista de ayudas:

- **Deducción fiscal en el Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas (IRPF):** Se establecen reducciones para las inversiones en obras

aplicables hasta el 31 de diciembre de 2025. Incluye una reducción del 20% de la cantidad invertida en reducir la demanda de calefacción al menos un 7% de una vivienda destinada para el uso habitual o alquiler, incluyendo un certificado energético que incluya los valores anteriores y posteriores para verificar la mejora, con un límite de 5.000 € por vivienda. También deduce el 40% de la inversión en obras que reduzcan un 30% el consumo de energía primaria no renovable u obtengan una calificación energética A o B, con un límite de 7.000 € por obra. Por último, se deduce el 60% de la cantidad invertida en obras que reduzcan al menos un 30% del consumo de energía primaria no renovable o la mejora de la calificación energética con letras A y B. Esta última solo aplica a obras de edificio completo y limita la ayuda en 15.000 € por vivienda [129, 54].

- **Programa de Rehabilitación Energética de Edificios (PREE y PREE 5000):** El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) trabaja conjuntamente con las Comunidades Autónomas que fomenten la rehabilitación energética de edificios existentes. PREE 5000 aplica a municipios con menos de 5.000 habitantes, esta habilita ayudas de hasta el 85% del coste subvencionable para sustituir instalaciones térmicas por sistemas de energías renovables [128].
- **Real Decreto 477/2021 (Ayudas al Autoconsumo, Almacenamiento y Climatización Renovable):** El Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (NextGenerationEU) presenta subvenciones de entre el 40% y el 70% del coste de la instalación de sistemas de climatización que incluyan energías renovables (solar térmica, geotérmica, hidrotérmica y aerotermia) dependiendo de la tecnología, con un 5% adicional para municipios con reto demográfico [128].
- **Ayudas Europeas:** El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia destina fondos europeos con beneficios de entre 6.300 y 18.000 € por vivienda dependiendo del ahorro energético de la rehabilitación energética de edificios residenciales con un mínimo del 30% [186, 158].
- **Bonificaciones en el Impuesto sobre Bienes Inmuebles (IBI):** Algunos municipios ofrecen bonificaciones por la mejora de la eficiencia energética de la vivienda. Puede alcanzar el 50% del IBI por la instalación de sistemas de climatización renovable, una medida habilitada por el Decreto 7/2025 para promover las energías limpias. Un ejemplo de aplicación se encuentran en Cantabria (Castro Urdiales) con un 50 % de reducción para los próximos 5 años. [102].

Estas compensaciones se calculan sobre la cuota íntegra aplicada y suelen tener requisitos como certificado energético, homologación del equipo y solicitud previa al ayuntamiento.

# Chapter 3

## Certificado de Eficiencia Energética (CEE)

### 3.1 Introducción

El Certificado de Eficiencia Energética (CEE) se implantó con el Real Decreto 235/2013 y se actualizó con el Real Decreto 390/2021 para evaluar la demanda energética, el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, y clasificar las viviendas en una tabla de letras que representan su situación energética, siendo una A la letra con mayor eficiencia y la G la que representa la peor eficiencia. Para promover el uso del certificado energético se prohibió la venta o alquiler de viviendas sin su etiqueta con su estudio aprobado previo, una medida idéntica a la nueva restricción para 2030, estableciendo los mínimos cada vez más altos acorde con la tendencia evolutiva que respecta a la eficiencia energética de las viviendas [119, 121].

Actualmente la situación del parque de viviendas español está en un claro subdesarrollo donde cada diez edificios, ocho poseen una calificación energética deficiente (E, F o G), lo que significa que el rendimiento general de la vivienda española está desfasado respecto a la tecnología accesible para mejorar la eficiencia energética de las viviendas [79]. Como se ha ido mencionando a lo largo del estudio, la causa de esta situación reside en la instalación con baja eficiencia energética de sistemas de climatización, aislamiento térmico, iluminación, electrodomésticos, ventanas y puertas. Los sistemas que se instalaron en edificios antiguos no se han renovado y se encuentran obsoletos.

A raíz de la creación de normativas y subvenciones que estimulan el desarrollo energético de las viviendas, se creó un calendario regulatorio para iniciar un proceso sin pausa. La normativa surge a partir de la iniciativa europea con la Directiva 2024/1275, una actualización de la Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) que busca unas metas más ambiciosas que su predecesora como

pueden ser los edificios de cero emisiones. Esta directiva forzó la adaptación del marco regulatorio español, prohibiendo la venta o alquiler de inmuebles con calificaciones inferiores a “E” a partir del 2030 y elevando el límite a la letra “D” en 2033 [210]. Una iniciativa que fuerza inevitablemente a los propietarios y arrendadores a realizar las reformas pertinentes, de lo contrario, podrían verse envueltos en sanciones por incumplimiento. Hasta ahora, el certificado energético tenía un leve impacto sobre el valor de la vivienda, pero gracias a las actualizaciones energéticas que respecta a la vivienda, la correlación entre el precio de la vivienda y su certificado energético cada vez es mayor.

En este capítulo se explica el certificado de eficiencia energética, presentándose como la herramienta de evaluación del comportamiento energético de los edificios. Se explican la normativa que define los requisitos del certificado, incluyendo el marco europeo establecido por la Directiva 2010/31/UE y su adaptación en la legislación española mediante el Real Decreto 390/2021. Se presenta la estructura del certificado energético, sus indicadores y los métodos de cálculo.

Por último, se describirán las herramientas reconocidas por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico que se emplean para calcular la calificación energética, como HULC, CE3X y CERMA, y se explica su importancia sobre los objetivos de descarbonización establecidos por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y la Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE).

## 3.2 Marco normativo

### 3.2.1 Real Decreto 235/2013

El Real Decreto 235/2013 entró en vigor el 1 de junio del 2013 e introduce el cálculo estandarizado para la eficiencia energética de edificios nuevos, edificios existentes en proceso de compra, venta o alquiler, edificios con flujo habitual de personas superando los 500 m<sup>2</sup> y edificios públicos que superen 250 m<sup>2</sup>, un proceso que surge para ajustar la normativa española a la Directiva Europea 2010/31/UE [119].

Se establece que las comunidades autónomas pueden añadir requisitos adicionales, por lo tanto, aunque en este documento se resumen todos los documentos que legislan el proceso de obtención del certificado energético, se recomienda comprobar si existe alguna restricción o cambio en la comunidad autónoma donde se registre la mejora.

El artículo 6 del Real Decreto 235/2013 especifica la información que incluye el certificado:

- Identificación del edificio: Generada por la Dirección General del Catastro,

un código alfanumérico de 20 caracteres único para cada edificio denominada referencia catastral, se emplea para ubicar y conocer con exactitud cuál es el inmueble, para trámites legales y fiscales, y para evitar fraudes o errores en transacciones.

- Programa utilizado para realizar el cálculo energético. En el Real Decreto 235/2013 se incluye un Registro General de Documentos Reconocidos para facilitar el acceso a toda la información pertinente al cálculo energético [162].
- Normativa aplicada en la construcción.
- Informe de la envolvente térmica, las instalaciones de climatización, iluminación y otros consumos energéticos.
- Calificación energética resultante en el cálculo del certificado.
- Procedimiento aplicado en el cálculo, incluyendo sus pruebas y comprobaciones.
- Sello de confirmación de cumplimiento de todos los requisitos medioambientales establecidos para instalaciones térmicas.
- En caso de que la mejora se realice en edificios existentes, se deberá incluir una recomendación de mejora con su ROI y comparativa entre el coste y el aumento de eficiencia energética.

Una vez se genera el certificado, se debe entregar al organismo autonómico que lo incluya en el registro en el plazo de un mes, perdiendo su validez si se realizan otras mejoras o transcurren 10 años desde su emisión o 5 años si la calificación energética es muy deficiente, “G”. En cualquier transacción que se realice sobre la vivienda se debe de informar sobre su calificación energética; su omisión o falsificación es sancionable como infracciones leves hasta muy graves dependiendo de la ofensa.

### 3.2.2 Real Decreto 390/2021

Emitido el 1 de junio de 2021, al igual que el anterior Real Decreto 235/2013, surge de una adaptación de la normativa española para ajustarse a los nuevos requisitos de la Directiva Europea 2018/844. Incluye los requisitos del anterior Real Decreto e incorpora nuevas adaptaciones [121, 73].

Su objetivo se centra en maximizar la eficiencia energética, reduciendo todo lo posible el uso de energía no renovable para eliminar paulatinamente la emisión de GEI del parque de viviendas. Al ámbito de aplicación se le añaden las rehabilitaciones que sustituyan las instalaciones térmicas o con una modificación de

la envolvente térmica superior al 25 %, y las ampliaciones de más del 10 % de la superficie o volumen inicial en superficies mayores a 50 m<sup>2</sup>.

El Ministerio de Transportes y MITERD establecen los documentos oficiales necesarios para el certificado energético con formato XML, la verificación y procedimiento del cálculo y las guías técnicas utilizadas. Una vez generado, se comprueba por el técnico competente de manera presencial y se emite, con un plazo máximo de un mes al registro del Ministerio para la Transición Ecológica.

Se crea un Registro Administrativo Centralizado que archiva todos los informes en formato XML para generar las estadísticas generales del parque de viviendas español y crea la responsabilidad autonómica de llevar a cabo el muestreo de los datos con la verificación de resultados y por visitas presenciales en las viviendas para comprobar la concordancia entre el certificado y la realidad, estas visitas suelen realizarse de manera periódica.

Por último, se especifica con mayor detalle la información necesaria en el apartado de recomendaciones sobre posibles intervenciones, recomendaciones que deben de poder llevarse a cabo, deben incluir un cálculo preciso del ROI y disponer de una relación entre el coste de la propuesta y el ahorro previsto con una estimación del coste. Solo si la mejora de eficiencia existe, en caso contrario, se deberá de incluir una justificación técnica sobre su ausencia[138].

### 3.2.3 RITE

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios unifica el marco normativo español aplicado a instalaciones de calefacción, refrigeración, ventilación y ACS. Se aplica en edificios de nueva construcción y rehabilitaciones para instalaciones térmicas cuya potencia útil nominal supere los 5 kW en climatización con una memoria técnica o 70 kW en conjunto para el cual se deberá de generar un proyecto. Su última actualización se generó acorde al Real Decreto 178/2021 con un enfoque en la eficiencia energética y la reducción del uso de combustibles fósiles, obligando la instalación de contadores individuales en viviendas con calefacción central para realizar revisiones periódicas del rendimiento de los sistemas, mejorar la claridad del consumo para el consumidor y digitalizar los sistemas térmicos para realizar una monitorización del consumo a distancia, sin necesidad de realizar la revisión presencial [164].

Se incluyen las exigencias técnicas y administrativas mencionadas anteriormente en el Real Decreto y controla la eficiencia energética con los siguientes controles:

- Rendimiento energético de los sistemas de climatización y dispositivos de transporte de fluidos.

- Descripción de la envolvente térmica de los equipos y conductos de transporte de fluidos térmicos.
- Descripción del control para mantener las condiciones de confort.
- Uso de fuentes de energía renovable, principalmente solar y biomasa.
- Uso de sistemas de recuperación de energía residual y recuperación de energía.
- Uso de sistemas para contabilizar el consumo de instalaciones colectivas.
- Reducción del uso de combustibles contaminantes.
- Reducción del uso de instalaciones poco eficientes.

Las instrucciones técnicas que incluye el RITE son:

- **Exigencias de bienestar e higiene (IT 1):** Busca mantener el bienestar térmico de la vivienda manteniendo las condiciones de confort por medio de la temperatura, humedad y la calidad del aire. También establece un control en la renovación del aire reduciendo la existencia de agentes contaminantes en el interior de la vivienda.
- **Rendimiento energético de los equipos (IT 2):** Se establecen los valores mínimos de eficiencia energética de los sistemas de climatización (caldera, bomba de calor) y ACS, usando la etiqueta energética europea (ErP) como sistema de uso obligatorio. Esta herramienta permite eliminar gradualmente el uso de combustibles fósiles con bajos niveles de eficiencia energética.
- **Exigencias de eficiencia energética (IT 3):** Se complementa la información del CTE con la limitación de la demanda energética con los niveles del CTE DB-HE1 y prohíbe el exceso de potencia instalada por encima del límite. El control y la regulación establece el uso de termostatos en espacios climatizados, válvulas termostáticas en emisores individuales y sistemas de regulación térmica por zonas funcionales para controlar la eficiencia. Los componentes que se dediquen al transporte de fluidos térmicos deben de aislarse y protegerse de los usuarios de la vivienda, incluyendo los espesores mínimos en función del coeficiente de conductividad térmica de la protección y el diámetro exterior. Por último, para los sistemas de ventilación mecánica, si gestionan un caudal de aire elevado, se debe instalar un sistema de recuperación aire-aire según el caudal de ventilación y su potencia térmica.

- **Utilización de energías renovables (IT 4):** Se exige la instalación de fuentes de energía renovable como la aerotermia o solar térmica (aunque también incluye geotermia, biomasa y cogeneración) destinada para Agua Caliente Sanitaria (ACS) en los proyectos con viabilidad técnica y económica.

El RITE forma parte de la definición del cálculo energético para cumplir con el requisito mínimo legal, pero, a diferencia del CTE, este no asegura una buena calificación energética, aunque la última actualización (RD 178/2021) ya incluye la recomendación de recursos renovables y busca la reducción de energía primaria no renovable con dispositivos eficientes y con alternativas al combustible fósil como la aerotermia.

### 3.2.4 Código Técnico de la Edificación (CTE)

El Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HE) establece la referencia para los valores límite de eficiencia energética alineados con los requisitos de las directivas europeas, de tal manera que el cumplimiento de la normativa respeta los niveles establecidos por iniciativas europeas. El objetivo se establece en reducir la energía necesaria para la utilización de edificios por medio de la mejora de las características, aunque se considera que gran parte de la reducción proviene de la instalación de fuentes de energía renovable [120, 152].

Se incluye la definición de edificio de consumo de energía casi nulo para aquellos edificios, tanto de nueva construcción como existentes, que cumplan las restricciones del DB-HE para edificios de nueva construcción, estableciendo así un umbral normativo que promueve un parque de edificios cada vez más cercano a los objetivos europeos de descarbonización del sector.

#### Factores climáticos y de uso

El territorio español se divide en 12 zonas climáticas establecidas en el Documento Básico DB-HE del CTE. Estas zonas se identifican con una letra que indica la severidad invernal (A - Clima suave, B, C, D, E - Clima frío) y un número que indica la severidad estival (1 - Verano suave, 2, 3, 4 - Verano caluroso) [74].

La clasificación por zonas climáticas permite normalizar las condiciones de cálculo del entorno (temperatura, humedad y radiación solar) que se emplean en el cálculo de la demanda energética del edificio, su consumo asociado y las emisiones. El primer paso para determinar los requisitos de climatización es conocer la zona climática, requisito que también existe en el cálculo de los límites de transmitancia térmica y permeabilidad del aire establecidos en el Código Técnico de la Edificación.

El Atlas Climático del IGN/AEMET calcula una temperatura media anual que en el territorio español oscila desde 0 °C en los Pirineos a 22 °C en la costa sur, la diversidad climática incluye paisajes montañosos y costas subtropicales que fuerza la adaptación del requisito energético al clima de la zona [134].

El CTE define el territorio en las siguientes zonas climáticas invernales y estivales:

- Zonas invernales: Existen 6 categorías divididas por el consumo de calefacción. La zona “0” se asocia al clima más suave, por lo tanto, representa la menor demanda de calor. Los siguientes niveles (A, B, C y D) suben proporcionalmente la demanda hasta la “E”, que representa el clima más frío y la mayor demanda.
- Zonas estivales: En el caso de la zona estival se mide con el consumo de refrigeración, comenzando con el “1” como el clima más suave y de menor demanda, hasta el “4”, que es el verano más caluroso y con mayor necesidad de equilibrarlo con un mayor consumo de climatización.

Al combinar la letra y el número se distinguen 17 zonas climáticas (aunque solo se aplican 12) que se asignan a cada localidad según los criterios especificados en el Apéndice C del CTE DB-HE. Primero se asigna una valoración común a cada provincia designada por la capital, y luego se ajusta la valoración respaldada por el Real Decreto 15/2018 a 8.100 municipios de España, dependiendo de la altitud. Esta adaptación permite a diferentes municipios de la provincia pertenecer a distintas zonas climáticas, ajustando a su vez el cálculo del consumo [212].

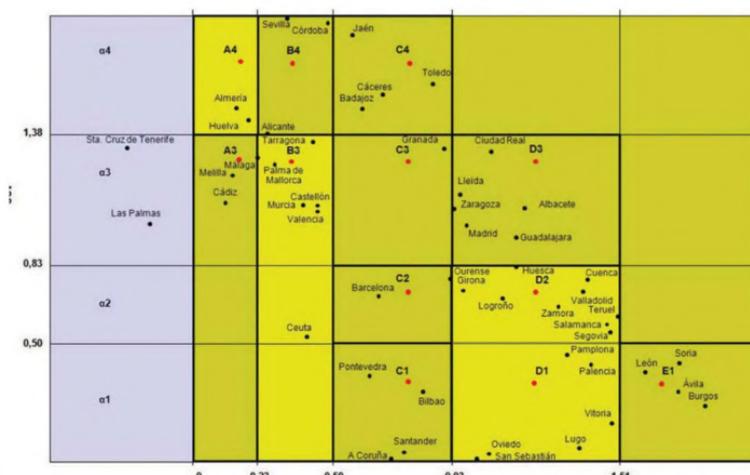


Figure 3.1: Distribución climática de las capitales de provincia según la zonificación ZCE y ZCI. Fuente: Larrumbide & Bedoya, 2015 [163].

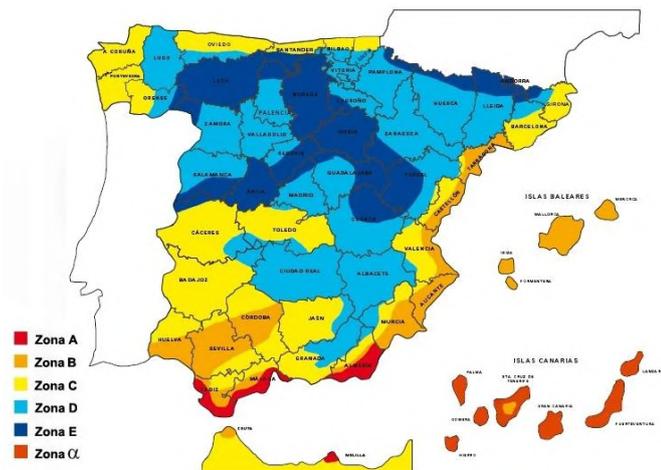


Figure 3.2: Distribución de las zonas climáticas del CTE por provincias y municipios en España [53].

Además, se presenta una simplificación para el cálculo energético, usada en programas de certificación como HULC y CE3X, en el Apéndice II de la normativa técnica con los valores del coeficiente de severidad climática global  $G$  (miles de horas·K/año), el cual se determina con la severidad del invierno y el verano de cada zona. El cálculo se basa en el consumo asociado a mantener las condiciones de confort, de tal manera que cuanto mayor sea el coeficiente de severidad climática, más energía se necesitará para mantener esas condiciones.

A continuación, se incluye la distribución de valores de  $G$  según la zona climática donde la horizontal representa la zona climática invernal (ZCI: A, B, C, D, E) y la vertical la zona climática estival (ZCV: 1, 2, 3, 4).

Climas peninsulares, Illes Balears, Ceuta y Melilla (valores en miles de horas · K/año)

		Zona climática invierno (ZCI)				
		A	B	C	D	E
Zona climática verano (ZCV)	1			44	60	74
	2			45	60	
	3	25	32	46	61	
	4	26	33	46		

Figure 3.3: Tabla de valores del coeficiente climático  $G$  según zona climática (ZCV/ZCI) en España [65].

### 3.2.5 Limitación del consumo energético (HE0)

En esta sección se busca reducir el consumo energético global del parque de edificios, ajustando las reducciones necesarias a la zona climática, el perfil de uso y si se trata de una rehabilitación, el alcance de esta. El reglamento incluye valores para edificios de nueva construcción, rehabilitaciones de ampliación de más del 10% de volumen o de cambio de uso para superficies superiores a 50 m<sup>2</sup> y la mejora de la envolvente térmica que incluya la renovación de más de la cuarta parte de los ceramamientos, a excepción de los edificios protegidos, construcciones provisionales con un periodo máximo de dos años, las naves destinadas a aplicaciones industriales o agropecuarias que ya tengan una baja demanda térmica y los edificios aislados cuya superficie no supere los 50 m<sup>2</sup> [151].

Se establecen dos indicadores para representar el consumo energético.

#### Energía primaria no renovable ( $C_{ep,nren}$ )

El valor del consumo de energía primaria no renovable para los servicios de calefacción, refrigeración y ACS no puede superar al valor límite ( $C_{ep,lim}$ ) que en la versión 2013 se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_{ep,lim} = C_{ep,base} + \frac{F_{ep,sup}}{S} \quad [\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{año}] \quad (3.1)$$

Donde  $C_{ep,base}$  referencia el valor base de consumo energético de energía primaria no renovable establecido según el valor de la zona climática en invierno del edificio y  $F_{ep,sup}$  representa el factor corrector del consumo energético dividido por la superficie.

El consumo energético de energía primaria no renovable base se presenta con la zona climática de invierno asignada al propio edificio junto con el ejemplo de cálculo para distintas superficies, incluidos a continuación:

**Tabla 2.1 Valor base y factor corrector por superficie del consumo energético**

	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A*	B*	C*	D	E
$C_{ep,base}$ [kW·h/m <sup>2</sup> ·año]	40	40	45	50	60	70
$F_{ep,sup}$	1000	1000	1000	1500	3000	4000

\* Los valores de  $C_{ep,base}$  para las zonas climáticas de invierno A, B y C de Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla se obtendrán multiplicando los valores de  $C_{ep,base}$  de esta tabla por 1,2.

La siguiente tabla muestra los valores límite obtenidos para varias superficies del edificio:

Severidad climática de invierno	Energía primaria límite [kW·h/m <sup>2</sup> ·año]					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Superficie útil = 100m <sup>2</sup>	50	50	55	65	90	110
Superficie útil = 500m <sup>2</sup>	42	42	47	53	66	78
Superficie útil = 1000m <sup>2</sup>	41	41	46	52	63	74
Superficie útil = 5000m <sup>2</sup>	40	40	45	50	60	71

En el caso de las viviendas unifamiliares adosadas se entiende, a efectos de cuantificación de la exigencia y la consideración de la corrección por superficie, que constituyen edificios independientes aunque formen parte de una única promoción.

Figure 3.4: Valores base de consumo de energía primaria no renovable base (2013) [151].

La fórmula establece una limitación dependiente de la superficie útil aumentando así la complejidad del cálculo y sin diferenciar el uso residencial del no residencial, mientras que la normativa actualizada elimina este cálculo y establece los valores mediante el uso de tablas directas donde no se discrimina por superficie útil sino por el uso del edificio y se introduce la carga interna media para uso no residencial para ajustar el cálculo.

**Tabla 3.1.a - HE0**  
Valor límite  $C_{ep,nren,lim}$  [kW·h/m<sup>2</sup>·año] para uso residencial privado

	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Edificios nuevos y ampliaciones	20	25	28	32	38	43
Cambios de uso a residencial privado y reformas	40	50	55	65	70	80

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25

**Tabla 3.1.b - HE0**  
Valor límite  $C_{ep,nren,lim}$  [kW·h/m<sup>2</sup>·año] para uso distinto del residencial privado

$\alpha$	Zona climática de invierno					
	A	B	C	D	E	
	$70 + 8 \cdot C_{FI}$	$55 + 8 \cdot C_{FI}$	$50 + 8 \cdot C_{FI}$	$35 + 8 \cdot C_{FI}$	$20 + 8 \cdot C_{FI}$	$10 + 8 \cdot C_{FI}$

$C_{FI}$ : Carga interna media [W/m<sup>2</sup>]

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores resultantes por 1,40

Figure 3.5: Valores límite de consumo de energía primaria no renovable (2022) [87].

Como se puede observar, la restricción ha aumentado con respecto a los valores establecidos en la actualización del 2013, el proceso se ha simplificado y ajustado a los requisitos del Real Decreto 732/2019.

### Energía primaria total ( $C_{ep,tot}$ ):

Representa el consumo de energía primaria total, tanto renovable como no renovable. El cálculo se debe de realizar bajo el mismo uso, de tal manera que si un edificio tiene áreas con distintos usos, se deberán tratar como independientes.

**Tabla 3.2.a - HE0**  
Valor límite  $C_{ep,tot,lim}$  [kW·h/m<sup>2</sup>·año] para uso residencial privado

	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Edificios nuevos y ampliaciones	40	50	56	64	76	86
Cambios de uso a residencial privado y reformas	55	75	80	90	105	115

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,15

**Tabla 3.2.b - HE0**  
Valor límite  $C_{ep,tot,lim}$  [kW·h/m<sup>2</sup>·año] para uso distinto del residencial privado

$\alpha$	Zona climática de invierno					
	A	B	C	D	E	
	$165 + 9 \cdot C_{FI}$	$155 + 9 \cdot C_{FI}$	$150 + 9 \cdot C_{FI}$	$140 + 9 \cdot C_{FI}$	$130 + 9 \cdot C_{FI}$	$120 + 9 \cdot C_{FI}$

$C_{FI}$ : Carga interna media [W/m<sup>2</sup>]  
En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores resultantes por 1,40

Figure 3.6: Valores límite de consumo de energía primaria total (2022) [87].

Para verificar el consumo primario se debe de realizar una clasificación de este por servicios (calefacción, refrigeración, ACS, ventilación, control de humedad e iluminación), se define la envolvente térmica y se calcula para todo el año, dependiendo del programa utilizado, se calculará con frecuencia mensual o diaria, aportando un cálculo simplificado o más detallado.

### 3.2.6 Control de la demanda energética (HE1)

La demanda energética también está limitada por el clima de la zona y de la carga interna de la vivienda, por ello, la demanda disminuye cuando las características de los cerramientos y de las particiones interiores de la envolvente térmica respeten los valores establecidos por la normativa, esta sección se centra en la reducción de la demanda energética por medio de la mejora de la envolvente térmica. Se plantea una medida preventiva para eliminar las posibles descompensaciones térmicas entre espacios que producen pérdidas y ganancias térmicas, limitando la

transmitancia térmica, el coeficiente global de transmisión de calor, el control solar y la permeabilidad del aire [154].

<b>Cerramientos y particiones interiores</b>	<b>ZONAS A</b>	<b>ZONAS B</b>	<b>ZONAS C</b>	<b>ZONAS D</b>	<b>ZONAS E</b>
Muros de fachada, <i>particiones interiores</i> en contacto con espacios <i>no habitables</i> , primer metro del perímetro de suelos apoyados sobre el terreno <sup>(1)</sup> y primer metro de muros en contacto con el terreno	1,22	1,07	0,95	0,86	0,74
Suelos <sup>(2)</sup>	0,69	0,68	0,65	0,64	0,62
Cubiertas <sup>(3)</sup>	0,65	0,59	0,53	0,49	0,46
Vidrios y marcos	5,70	5,70	4,40	3,50	3,10
Medianerías	1,22	1,07	1,00	1,00	1,00

<sup>(1)</sup> Se incluyen las losas o soleras enterradas a una profundidad no mayor de 0,5 m

<sup>(2)</sup> Las particiones interiores en contacto con espacios no habitables, como en el caso de cámaras sanitarias, se consideran como suelos

<sup>(3)</sup> Las particiones interiores en contacto con espacios no habitables, como en el caso de desvanes no habitables, se consideran como cubiertas

Figure 3.7: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en W/m<sup>2</sup>·K (DB-HE1) (2013).

**Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica, U<sub>lim</sub> [W/m<sup>2</sup>·K]**

<b>Elemento</b>	<b>Zona climática de invierno</b>					
	<b>α</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U <sub>s</sub> , U <sub>M</sub> )	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U <sub>c</sub> )	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U <sub>T</sub> ) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la <i>envolvente térmica</i> (U <sub>MD</sub> )	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
<i>Huecos</i> (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U <sub>H</sub> )*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%				5,7		

\*Los *huecos* con uso de escaparate en *unidades de uso* con actividad comercial pueden incrementar el valor de U<sub>H</sub> en un 50%.

Figure 3.8: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en W/m<sup>2</sup>·K (DB-HE1) (2022).

Se puede observar de la comparación entre las distintas versiones de la normativa como se ha endurecido la restricción buscando la optimización de la envolvente térmica. En el caso de la rehabilitación, se modificarán los elementos que se modifiquen o en caso de un incremento en las necesidades energéticas de la vivienda.

Además, en la actualización de 2013, se establecieron los valores límite de transmitancia para muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno, suelos, cubiertas y el factor solar modificado límite de lucernarios para cada zona climática e incluye los valores de transmitancia de huecos y factor solar para cargas

internas, completando todos los datos necesarios para el cálculo de la demanda. A continuación, se muestran varios ejemplos para distintas zonas climáticas.

ZONA CLIMÁTICA B4										
Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno					$U_{Mlim}: 0,82 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Transmitancia límite de suelos					$U_{Slim}: 0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Transmitancia límite de cubiertas					$U_{Clim}: 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Factor solar modificado límite de lucernarios					$F_{Lim}: 0,28$					
% de superficie de huecos	Transmitancia límite de huecos <sup>(1)</sup> $U_{Hlim} \text{ W/m}^2\text{K}$				Factor solar modificado límite de huecos $F_{Hlim}$					
	N	E/O	S	SE/SO	Carga interna baja			Carga interna alta		
					E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	5,4 (5,7)	5,7	5,7	5,7	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,8 (4,7)	4,9 (5,7)	5,7	5,7	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	3,3 (3,8)	4,3 (4,7)	5,7	5,7	-	-	-	0,55	-	0,57
de 31 a 40	3,0 (3,3)	4,0 (4,2)	5,6 (5,7)	5,6 (5,7)	0,55	-	0,58	0,42	0,59	0,44
de 41 a 50	2,8 (3,0)	3,7 (3,9)	5,4 (5,5)	5,4 (5,5)	0,45	-	0,48	0,34	0,49	0,36
de 51 a 60	2,7 (2,8)	3,6 (3,7)	5,2 (5,3)	5,2 (5,3)	0,39	0,55	0,41	0,29	0,42	0,31

<sup>(1)</sup> En los casos en que la transmitancia media de los muros de fachada  $U_{Mm}$ , definida en el apartado 3.2.2.1, sea inferior a 0,58 W/m<sup>2</sup>K se podrá tomar el valor de  $U_{Hlim}$  indicado entre paréntesis para las zonas climáticas B3 y B4.

Figure 3.9: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica  $U$  en  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  (DB-HE1) (2022).

El primer ejemplo pertenece a la zona B4, un clima cálido con invierno suave y verano caluroso como sería Sevilla o Córdoba donde el consumo energético se concentra en el periodo estival con sistemas de refrigeración, por ello los valores de transmitancia límite son mayores o más permisivos centrándose principalmente en reducir la ganancia térmica por conducción, ya que en el periodo invernal la pérdida térmica es reducida. En consecuencia, se requiere un mayor foco en la reducción del sobrecalentamiento por radiación solar que se refleja con el factor solar.

ZONA CLIMÁTICA D3										
Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno					$U_{Mlim}: 0,66 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Transmitancia límite de suelos					$U_{Slim}: 0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Transmitancia límite de cubiertas					$U_{Clim}: 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Factor solar modificado límite de lucernarios					$F_{Lim}: 0,28$					
% de superficie de huecos	Transmitancia límite de huecos <sup>(1)</sup> $U_{Hlim} \text{ W/m}^2\text{K}$				Factor solar modificado límite de huecos $F_{Hlim}$					
	N	E/O	S	SE/SO	Carga interna baja			Carga interna alta		
					E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	3,5	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,0 (3,5)	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,5 (2,9)	2,9 (3,3)	3,5	3,5	-	-	-	0,54	-	0,57
de 31 a 40	2,2 (2,5)	2,6 (2,9)	3,4 (3,5)	3,4 (3,5)	-	-	-	0,42	0,58	0,45
de 41 a 50	2,1 (2,2)	2,5 (2,6)	3,2 (3,4)	3,2 (3,4)	0,50	-	0,53	0,35	0,49	0,37
de 51 a 60	1,9 (2,1)	2,3 (2,4)	3,0 (3,1)	3,0 (3,1)	0,42	0,61	0,46	0,30	0,43	0,32

<sup>(1)</sup> En los casos en que la transmitancia media de los muros de fachada  $U_{Mm}$ , definida en el apartado 3.2.2.1, sea inferior a 0,47 W/m<sup>2</sup>K se podrá tomar el valor de  $U_{Hlim}$  indicado entre paréntesis para las zonas climáticas D1, D2 y D3.

Figure 3.10: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica  $U$  en  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  (DB-HE1) (2022).

El segundo ejemplo es de la zona D3, representa un clima templado con un

invierno frío y verano caluroso como el que se podría encontrar en Madrid. Debido a la variación de temperaturas entre estaciones, se refleja una subida de todos los niveles respecto al apartado anterior por el aumento de las pérdidas energéticas a lo largo de las estaciones. Es necesario asegurar los espesores de las cubiertas para reducir la exposición de la vivienda a la radiación solar. A su vez, es necesario tratar los puentes térmicos que generan grandes pérdidas en invierno y ganancias no deseadas en verano.

ZONA CLIMÁTICA E1										
Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno					$U_{Mlim}: 0,57 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Transmitancia límite de suelos					$U_{Slim}: 0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Transmitancia límite de cubiertas					$U_{Clim}: 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Factor solar modificado límite de lucernarios					$F_{Lim}: 0,36$					
% de superficie de huecos	Transmitancia límite de huecos <sup>(1)</sup> $U_{Hlim} \text{ W/m}^2\text{K}$				Factor solar modificado límite de huecos $F_{Hlim}$					
	N	E/O	S	SE/SO	Carga interna baja			Carga interna alta		
	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO	
de 0 a 10	3,1	3,1	3,1	3,1	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,1	3,1	3,1	3,1	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,6 (2,9)	3,0 (3,1)	3,1	3,1	-	-	-	-	-	-
de 31 a 40	2,2 (2,4)	2,7 (2,8)	3,1	3,1	-	-	-	0,54	-	0,56
de 41 a 50	2,0 (2,2)	2,4 (2,6)	3,1	3,1	-	-	-	0,45	0,60	0,49
de 51 a 60	1,9 (2,0)	2,3 (2,4)	3,0 (3,1)	3,0 (3,1)	-	-	-	0,40	0,54	0,43

<sup>(1)</sup> En los casos en que la transmitancia media de los muros de fachada  $U_{Mlim}$ , definida en el apartado 3.2.2.1, sea inferior a 0,43  $\text{W/m}^2\text{K}$  se podrá tomar el valor de  $U_{Mlim}$  indicado entre paréntesis para la zona climática E1.

Figure 3.11: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  (DB-HE1) (2022).

Para terminar, se muestra la zona E1 que se encuentra en zonas con altitudes elevadas con climas fríos de inviernos muy fríos y veranos suaves, ejemplos de esta zona son Asturias o Huesca. En este caso, los espesores de la envolvente deberán ser mucho mayores para minimizar las pérdidas energéticas durante el invierno, las cuáles son críticas en climas tan fríos para cumplir con los objetivos de reducción de consumo de energía primaria no renovable.

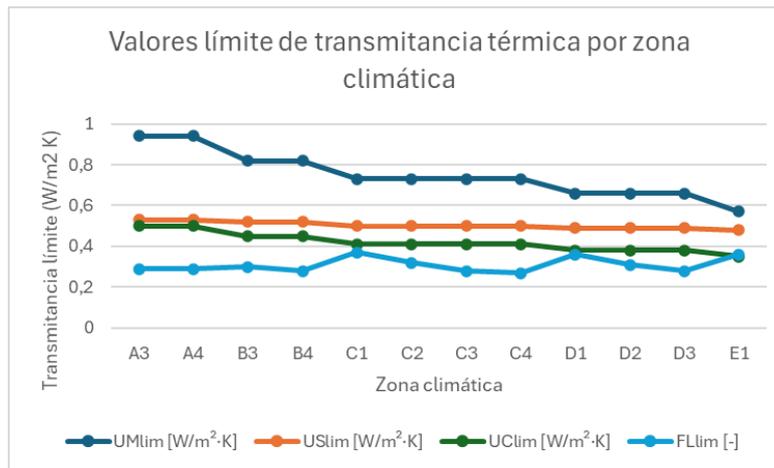


Figure 3.12: Valores límite de transmitancia térmica y factor solar por zona climática. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en esta gráfica, los valores de transmitancia térmica se endurecen con la severidad climática, aunque no tienen la misma evolución. La transmitancia de muros es la que más se endurece con los climas fríos, reflejando el centro de pérdidas energéticas de la vivienda, ya que suelen ser los puntos más descubiertos de la vivienda y con mayor superficie expuesta. La siguiente categoría con mayor importancia son las cubiertas. Como se ha mencionado previamente, se considera un aumento notable de las pérdidas en climas fríos, se refleja en la gráfica con una bajada de la transmitancia límite a partir de la zona C1 con inviernos que empiezan a ser fríos. Los suelos no poseen gran variación de sus valores a lo largo de las zonas climáticas, por ser la categoría con la mayor estabilidad en el intercambio térmico con el terreno, aunque se tratan como excepción aquellas viviendas que estén directamente en contacto con el terreno. Por último, el factor solar muestra una evolución totalmente diferente a las demás categorías, ya que está definida por el periodo estival. Los niveles 3 y 4 (veranos calurosos) presentan una restricción mayor para reducir la ganancia térmica, mientras que en los climas 1 y 2 (veranos suaves) se relaja la restricción.

Se limitan otros valores mencionados anteriormente como el coeficiente global de transmisión de calor que define la pérdida térmica según la compacidad (relación entre el volumen del espacio cubierto por la envolvente y la superficie de la misma) y el tipo de uso. El límite del control solar de la envolvente térmica establecido con referencia al mes de julio donde en uso residencial se limita a  $\leq 2 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mes}$ , mientras que para otros usos la restricción se relaja hasta  $\leq 4 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mes}$ . La permeabilidad del aire en los huecos de la envolvente térmica se limitarán a  $27 \text{ m}^3$  de aire/h·m<sup>2</sup> de superficie para las zonas  $\alpha$ , A y B y  $9 \text{ m}^3$  de aire/h·m<sup>2</sup> en las zonas C, D y E. Por último, se controlan las descompensaciones con la transmitancia

térmica de las particiones interiores y la aparición de condensación en la envolvente térmica.

### 3.2.7 Rendimiento de las instalaciones térmicas (HE2)

La sección HE2 no incluye ninguna guía para el cálculo energético, el único requisito de este apartado es lograr la aprobación de los requisitos del RITE para las instalaciones de calefacción, refrigeración, ventilación, ACS y el control de humedad mencionadas anteriormente. El cumplimiento del mismo asegura el bienestar térmico de los habitantes de la vivienda con un consumo energético alineado con los objetivos europeos [152].

### 3.2.8 Eficiencia energética de la iluminación (HE3)

Este apartado regula la eficiencia de la iluminación interior de la vivienda en edificios nuevos, rehabilitaciones que modifiquen al menos una cuarta parte de la superficie iluminada (superior a 1000 m<sup>2</sup>), reformas de locales con fines comerciales o administrativos que incluyan la modificación de la iluminación (excluidas viviendas particulares, edificios protegidos, construcciones provisionales con una duración menor a 2 años, edificios industriales, talleres, agrícolas o independientes con superficie menor a 50 m<sup>2</sup> y alumbrado de emergencia) [155].

Como el ámbito de aplicación de este estudio son las viviendas, solo es aplicable el apartado correspondiente a edificios nuevos. Se buscarán soluciones que cubran las necesidades de los usuarios, con el foco en maximizar la eficiencia energética y con la obligación de incorporar una regulación de iluminación según la ocupación de la zona y la cantidad de luz natural accesible para su aprovechamiento en cada momento. Se incluye un control manual independiente por zona de encendido y apagado y detectores de presencia en espacios de uso esporádico.

**Eficiencia energética de la instalación (VEEI)** La eficiencia energética de la instalación (VEEI) compara la eficiencia energética del sistema de iluminación con el confort visual que aporta. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$VEEI = \frac{\text{Potencia Instalada}}{\text{Superficie} \cdot \text{Iluminancia Media Proyectada (@100 lux)}}$$

Además, se limita la potencia instalada máxima por superficie iluminada ( $P_{\text{tot,lim}}/S_{\text{tot}}$ ).

### 3.2.9 Contribución solar mínima de ACS (HE4)

Como se mencionó anteriormente, los objetivos europeos buscan reducir el uso de energía no renovable. El primer foco de la mejora permanece en mejorar el ais-

lamiento térmico para reducir la demanda energética, pero, este apartado busca incorporar la energía solar térmica como tecnología principal para potenciar el cambio energético. Desde 2019 se permiten también otras tecnologías como cogeneración renovable, bombas de calor eléctricas con rendimiento estacional  $> 2,5$ , bombas de calor térmicas con rendimiento estacional  $> 1,15$ , biomasa o sistemas urbanos de calefacción con acceso individual [156].

Este apartado define la contribución mínima de energía renovable para cubrir la demanda energética de Agua Caliente Sanitaria (ACS) de edificios nuevos o rehabilitaciones con renovación completa de la instalación térmica, con una demanda mínima de ACS  $> 100$  litros/día, así como ampliaciones con incrementos mayores al 50 % de la demanda inicial si la demanda base supera los 5000 L/día, y para la climatización de piscinas cubiertas nuevas o existentes.

El requisito mínimo exige cubrir el 70 % de la demanda energética de ACS o climatización de piscinas, mientras que si la demanda no supera los 5000 L/día solo se requiere cubrir el 60 % de la demanda energética. En ampliaciones, solo se exige cubrir el incremento sobre la demanda original. Para supervisar la cantidad de energía suministrada se usarán sistemas de medida energética especificados en el RITE. Si se dispone de acceso a energía residual útil, proveniente de elementos de la vivienda como la nevera, se podrá aprovechar para cubrir hasta el 20 % de la demanda energética en edificios residenciales.

### 3.2.10 Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica (HE5)

Este apartado es similar al anterior, pero aplica a generación eléctrica renovable para uso propio o inyección a red, cumpliendo objetivos de descarbonización. Aplica a edificios nuevos con una superficie  $> 1000$  m<sup>2</sup>, ampliaciones incremento de la superficie  $> 1000$  m<sup>2</sup> y edificios existentes con rehabilitaciones integrales o cambios de uso con una superficie mínima de 1000 m<sup>2</sup> [157].

El cálculo de la potencia mínima fotovoltaica se obtiene comparando dos cálculos y seleccionando el valor con menor rango:

$$P_1 = \text{factor de uso} \times S_{\text{total}} \quad (3.2)$$

$$P_2 = 0,1 \cdot (0,5 \cdot S_c - S_{oc}) \quad (3.3)$$

El factor de uso 0,005 kW/m<sup>2</sup> para residencial privado, y 0,010 kW/m<sup>2</sup> para otros usos.  $S_c$  se refiere a la superficie de cubierta no transitable y  $S_{oc}$  a la sección de la superficie de la cubierta no transitable donde se sitúan los captadores solares térmicos. Si no se pudiese alcanzar la potencia mínima, se deberá justificar y se adoptarán las medidas que aseguren la máxima potencia instalada posible.

## 3.3 Metodología de cálculo y escalas de calificación

### 3.3.1 Cálculo energético

El cálculo energético de una vivienda se realiza acorde al CTE DB-HE considerando las zonas climáticas, los perfiles de uso y un edificio de referencia donde los parámetros que afectan a la envolvente se determinan según el tipo y espesor del material, el formato constructivo, la orientación y altitud de la vivienda. Ayudan a definir un procedimiento estandarizado de cálculo de la eficiencia energética de la vivienda según su zona climática.

Los parámetros que definen el comportamiento de la envolvente térmica son:

- Transmitancia térmica de muros de fachada (UM)
- Transmitancia térmica de cubiertas (UC)
- Transmitancia térmica de suelos (US)
- Transmitancia térmica de cerramientos en contacto con el terreno (UT)
- Transmitancia térmica de huecos (UH)
- Transmitancia térmica de medianerías (UMD)
- Factor solar modificado de huecos (FH)
- Factor solar modificado de lucernarios (FL)

Primero se define la zona climática de la vivienda. El Apéndice B del DB-HE Sección B.1 del Código Técnico de la Edificación establece una división que clasifica las zonas climáticas de España dependiendo de la provincia a la que pertenece y su altitud. Además, se puede encontrar en el Apéndice C del CTE-HE1 los valores de referencia que se consideran para calcular el certificado energético con el uso de perfiles de uso definidos, esto permite la comparación de distintos proyectos que mantienen las mismas condiciones.

A continuación, se especifica la información que incluye el Apéndice C [150]:

- **Tabla de horarios tipo:** Establece el rango de horas donde se estima que la vivienda se encuentre habitada y especifica el consumo energético de iluminación y electrodomésticos. Su utilidad es facilitar el cálculo de eficiencia.
- **Temperaturas de confort:** Se establecen las temperaturas de confort para invierno 20 °C (por lo tanto la calefacción se fija a 20 °C) y en verano 25 (Refrigeración a 25 °C) para realizar una comparación equitativa entre edificios con las mismas características interiores.

- **Espacios acondicionados:** Los espacios acondicionados son las habitaciones (salón, dormitorios) porque se asumen que estarán climatizados, los pasillos y trasteros depende de la decisión técnica aunque es habitual considerar acondicionado todo el espacio habitable.
- **Cargas internas bajas:** Aquellas cargas inferiores a  $6 \text{ W/m}^2$ , asociadas al calor que generan las personas, iluminación y electrodomésticos.

Con estos datos se comienza a calcular la calificación energética modelizando la envolvente térmica. Esta se divide en:

- **Envolvente térmica:** Se especifican material, espesor y transmitancia térmica ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) de los elementos constructivos (muros, cubierta y suelo) y se completa la información especificando el factor solar de ventanas, puertas acristaladas o lucernarios. Para completar la definición de la envolvente se ubican los puentes térmicos que se encuentran en encuentro entre el forjado y la fachada, contornos de ventanas y otros lugares donde se pueda encontrar un punto frío por alguna unión.
- **Condiciones externas e internas:** Ayudan a calcular la transferencia de calor del inmueble y su relación con su alrededor. Se calcula la zona climática donde se ubica la vivienda según el CTE para definir los datos climatológicos de referencia que se utilizarán para calcular la demanda energética, a su vez se tiene en cuenta la orientación de las fachadas para calcular la carga térmica creada por la radiación solar que toma en consideración las sombras creadas por otros edificios, voladizos, persianas u otros métodos de protección solar. Las orientaciones sur/este reciben una mayor radiación por la mañana aportando una carga térmica beneficiosa en climas fríos o invierno, aunque en verano requiere de protección térmica, herramientas como HULC realizan la simulación horaria anual para calcular la radiación solar incidente, las ganancias térmicas por radiación directa y difusa, las pérdidas térmicas por transmisión y ventilación y la temperatura operativa interior para calcular la energía necesaria para mantener las condiciones de confort predeterminadas. También se tienen en cuenta los valores del Apéndice C sobre los perfiles de uso según su ocupación y su infraestructura (iluminación, electrodomésticos y temperaturas de confort).
- **Instalaciones:** Se incorpora toda la información que respecta a los sistemas de climatización de la vivienda, incluyendo todos los sistemas expuestos en el capítulo anterior (Sistemas de calefacción, refrigeración, ACS), además, se incluyen sistemas de ventilación, ya sea natural o mecánica, sistemas de iluminación y sistemas de energías renovables. La definición de toda la infraestructura principal de consumo energético permite calcular la demanda

estimada con el rendimiento de cada equipo, calculando también las emisiones de GEI.

La calificación energética depende de la demanda de calefacción y refrigeración, de tal manera que si una vivienda unifamiliar se sitúa en una zona climática con clima cálido (Zonas A3-B4), la demanda de calefacción se reduce, mientras que en un clima frío (Zonas D2-E1) para conseguir las mismas condiciones de confort la demanda energética subirá y con ello, su calificación energética se verá afectada, por ello, en climas fríos es clave priorizar las medidas de reducción de la demanda energética como es la mejora del aislamiento térmico. Una vez se definen todos los apartados de la vivienda y se calcula tanto el consumo energético como sus emisiones para realizar la comparación con un modelo o edificio de referencia con la misma forma, superficie, orientación, zonas interiores, uso del espacio y obstáculos, es decir, estructuralmente se clona el edificio para obtener los valores de referencia a partir de soluciones constructivas normalizadas establecidas en el Apéndice D del CTE DB-HE1 [150].

### 3.3.2 Cálculo de demanda energética

La demanda anual energética ( $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$ ) se calcula mediante simulación con herramientas como HULC, CE3X o CERMA donde se computan los valores de la demanda energética de calefacción y refrigeración que se extrae de la suma ponderada de cada calefacción y refrigeración con su propia ponderación. La demanda global se calcula con:

- **Territorio peninsular:**  $D_g = D_{\text{cal}} + 0.7 \cdot D_{\text{ref}}$
- **Territorio extrapeninsular:**  $D_g = D_{\text{cal}} + 0.85 \cdot D_{\text{ref}}$

Se incluyen los consumos de ACS, iluminación y equipos que junto a los valores de eficiencia de los equipos y el coeficiente de paso del cerramiento pueden estimar el consumo de energía primaria no renovable ( $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$ ) y las emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{kgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{año}$ ).

### 3.3.3 Escala de calificación energética

La escala de la calificación energética de un edificio oscila desde una letra A, siendo esta la más eficiente, hasta la G, la menos eficiente. Es fácil confundir la calificación energética con la designación de la zona climática (A3 o C2), donde la letra representa la severidad del invierno, mientras que el número que la acompaña representa la severidad del verano. Como se ha mencionado anteriormente, la calificación surge de la comparación entre la simulación de los indicadores calculados

del edificio a valorar (demanda energética, consumo de energía primaria no renovable o consumo  $EP_{n,ren}$  y las emisiones asociadas) y los valores preestablecidos por la normativa española y europea [159].

Los edificios de bajo consumo, con adaptaciones nZEB o de edificio pasivo, corresponden a la clase A o B. El valor neutral corresponde a la clase C y se obtiene aplicando los requisitos de un edificio de consumo medio, mientras que los edificios con calderas de gas y aislamiento térmico deficiente o inexistente obtienen calificaciones con la letra G. Esta calificación envuelve a todos los edificios con rendimientos inferiores a la clase F.

Los rangos numéricos de la calificación dependen de la zona climática (localización y altitud), la tipología del edificio y si es de uso residencial o terciario. Se calculan para el edificio de referencia con los requisitos para edificaciones nuevas nZEB. El valor inicial pertenece a una clase neutra de letra C y el resto de categorías se obtienen con porcentajes descendentes para las clases A y B, y porcentajes crecientes para el resto de clases.

A continuación, se incluye una distribución aproximada de los valores límite de consumo de energía primaria no renovable para cada clase energética. Para calcular los siguientes resultados se han empleado valores de referencia del documento sobre la calificación de la eficiencia energética de los edificios de 2015, y se han ajustado con los valores de mejora de las normativas actuales:

Zona	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Clase E	Clase F
Consumo total de EP <sub>nren</sub> (kWh/m <sup>2</sup> ·año)						
A3	12,3	23,3	39,4	63,1	134,2	146,2
A4	13,7	25,9	43,8	70,2	144,6	157,6
B3	15,6	29,6	50,0	80,1	173,7	189,4
B4	19,2	33,1	54,0	84,8	184,3	200,9
C1	24,2	39,2	60,7	93,4	200,0	226,0
C2	26,8	43,4	67,3	103,5	212,9	240,5
C3	24,5	42,3	69,1	108,5	226,7	247,1
C4	26,2	45,2	73,7	115,8	237,0	267,8
D1	37,5	57,7	86,1	128,2	271,9	318,1
D2	35,3	57,2	88,7	136,3	284,7	333,1
D3	37,1	60,1	93,2	143,3	298,1	336,8
E1	46,9	72,1	107,5	160,1	358,8	419,8

Table 3.1: Valores límite del consumo total de energía primaria no renovable (EP<sub>nren</sub>) por zona climática y clase energética [159].

### 3.4 Herramientas de cálculo del certificado energético

El Real Decreto 235/2013, su actualización, el Real Decreto 390/2021 y el Código Técnico de la Edificación son los tres pilares que definen el procedimiento de cálculo

de la eficiencia energética de la vivienda para luego asignar su correspondiente letra. Actualmente existen numerosos programas reconocidos oficialmente que facilitan el cálculo de la eficiencia energética. Concretamente, el Real Decreto crea un procedimiento básico de certificación que incluye las acciones técnicas y administrativas básicas para realizar el cálculo y verificar la validez del certificado, mientras que el CTE traduce las exigencias de calidad del Real Decreto y crea un estándar de seguridad, habitabilidad y eficiencia energética para asegurar el cumplimiento del procedimiento de emisión del certificado energético.

### 3.4.1 Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)

Establece el procedimiento genérico desde una iniciativa pública que actúa como referencia para el resto de herramientas. Integra los módulos LIDER (Limitación de Demanda Energética) y CALENER (Calificación Energética de Edificios) que calculan la demanda de calefacción y refrigeración necesaria para mantener las temperaturas a 20°C en invierno y 25°C en verano (temperaturas establecidas como referencia de confort térmico) considerando el efecto de toda la envolvente térmica y el consumo de energía primaria asociado a todas las instalaciones que consuman electricidad y transformando el cálculo del consumo energético en emisiones de CO<sub>2</sub>, respectivamente. Una vez se ha estudiado la envolvente, la energía necesaria para mantener el confort y las emisiones asociadas a este consumo, primero se limita la demanda energética con los valores establecidos en la normativa HE-1 (coeficiente global de transmitancia térmica, renovaciones de aire y factor solar), una vez se ha ajustado la demanda se comprueba el consumo de energía primaria no renovable con la normativa HE-0. Además, se incluyen las normativas HE-4 “solar térmica” que comprueba la aportación mínima de energía solar y HE-5 “fotovoltaica” a partir de la versión de 2019. Una vez se completa el estudio, se asigna una letra que representará su calificación energética.

El estudio comienza creando una réplica virtual de la vivienda o edificio con los materiales y espesores equipados, se incluye la definición de los sistemas de climatización que mantienen las condiciones de confort durante la simulación equilibrando con el cálculo de cargas térmicas durante un año, calcula la ventilación e infiltraciones con precisión, acorde al DB-HS3 y extrae los datos de consumo y emisiones para luego asignar la calificación. El programa permite realizar cálculos en obra nueva y en rehabilitación. Genera los documentos oficiales en formato PDF y el formato reglamentario XML que certifican el cálculo y ofrece una gran precisión para edificios de emisiones casi nulas (nZEB), es la herramienta que abarca el procedimiento general, limitada por su dificultad de uso y curva de aprendizaje y los tiempos y tamaños de simulación para casos de edificios con grandes magnitudes. [76]

### 3.4.2 Cypertherm HE Plus

Desarrollada por una iniciativa privada de CYPE Ingenieros basada en el motor de simulación EnergyPlus, el cual destaca por su potencia que permite realizar una simulación horaria como HULC, aportando un comportamiento dinámico detallado a la envolvente. De tal forma que se habilita un cálculo del consumo energético más realista, considerándose uno de los simuladores más avanzados. Está destinada al cálculo de la certificación energética de edificios de viviendas unifamiliares, viviendas en bloque y edificios terciarios pequeños. El formato IFC (Industry Foundation Classes) se familiariza con la filosofía openBIM que le permite incorporar todo tipo de elementos constructivos a través del ecosistema BIMserver.center, sincronizar cualquier cambio de manera dinámica y unificada en el modelo, con una trazabilidad de versiones ordenada y coherente. Una herramienta de gran utilidad si se trabaja con el ecosistema BIM (Building Information Modeling) y, a la vez, una limitación para los que no tengan conocimientos de modelado BIM, al igual. Incluye la normativa HE-0, HE-1, HE-4 y HE-5, al igual que HULC y posee uno de los simuladores más avanzados, pero su uso es menor que el resto de herramientas por su complejidad, los requisitos computacionales para modelos complejos y su curva de aprendizaje [91].

### 3.4.3 SG SAVE

SG SAVE es una herramienta creada por Efinovatic que combina SketchUp (herramienta de modelado) con EnergyPlus (motor de cálculo energético) para calcular el certificado energético. Además, permite importar archivos gbXML desde Revit (software de BIM desarrollado por Autodesk) con elementos constructivos del ecosistema BIM. Primero se modela la geometría del edificio con SketchUp incluyendo los huecos, puentes térmicos y sombras, luego se define la envolvente y los materiales de los elementos constructivos, se incluyen los sistemas de climatización y se realiza un análisis horario (3680 horas) con el motor de simulación EnergyPlus. Una vez terminada la simulación, se realiza una verificación automática de las normativas HE-0 y HE-1 y se genera el certificado energético acorde a la normativa con formato XML. La interfaz de SketchUp soluciona el problema de Cypertherm HE Plus de necesitar experiencia en el entorno BIM y se aprovecha de la potencia del motor EnergyPlus para alcanzar el mismo detalle. Es una herramienta emergente que posee una menor adopción en comparación con las principales (HULC, CE3X, CERMA). [105]

### 3.4.4 TeKton3D TK-CEEP

La herramienta TeKton TK-CEEP pertenece al software TeKton3D, que posee un entorno gráfico de arquitectura CAD que facilita su posterior cálculo energético. Se creó con la homologación de procedimiento general aplicable a todo tipo de edificios (nuevos, existentes, residenciales y terciarios). Emplea el motor Energy-Plus y lo combina con el método de balance térmico de ASHRAE para obtener una simulación horaria detallada que, junto con el modelado 3D, permite incluir las interacciones entre zonas, sombras realistas, separar zonas térmicas y definir puentes térmicos reales. El análisis detallado proporciona un resultado de la demanda, consumo y emisiones que se contrasta automáticamente con HE-0 y HE-1. Adicionalmente, se pueden realizar las comprobaciones HE-4 y HE-5 con módulos opcionales. Se genera el certificado en PDF y XML con un desglose de la demanda mensual y anual por elementos constructivos. También ofrece la posibilidad de generar diferentes escenarios y comparar los resultados y costos.

### 3.4.5 CE3X

Patrocinado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), una entidad pública asociada al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Representa un proceso simplificado que realiza el balance mensual de edificios existentes residenciales y terciarios, al ser una herramienta más simple, el 95% de los certificados emitidos en España se realizan con CE3X por su agilidad. Para aplicar la herramienta a obra nueva se debe de utilizar el complemento de edificios nuevos. La sencillez de la herramienta proviene de la interfaz, incluyendo toda la información necesaria para describir la vivienda en una única interfaz rápida. Además, ofrece la incorporación de plugins de distintos fabricantes que aportan medidas de mejora basadas en cálculos económicos (comparación de proyectos según VAN y tiempo de amortización o ROI) [75].

Los beneficios de CE3X son la rapidez de aprendizaje de la herramienta, apoyada por una comunidad grande que aporta materiales (cursos, librerías de materiales, blogs...) para facilitar el aprendizaje. Es una herramienta que procesa el cálculo de la calificación energética y genera automáticamente certificado y el archivo con formato XML (eXtensible Markup Language) que almacena los datos del certificado en un formato estructurado. La información que incluye el archivo es:

- Datos del técnico certificador.
- Datos del edificio.
- Cálculo de la demanda energética, emisiones y la calificación obtenida.

- Descripción de la envolvente térmica y sus instalaciones.
- Recomendación de mejoras de ahorro.

Este formato es compartido para todos los programas mencionados y permite almacenar los datos en un formato compartido. Como desventajas, se puede mencionar la simplificación del caudal de ventilación y las infiltraciones (el usuario fija el caudal de renovación, mientras que HULC lo calcula dinámicamente), que en caso de superar ciertos límites establecidos, la herramienta fuerza a continuar el estudio en HULC. Además, los puentes térmicos se consideran con un comportamiento fijo y carece de gráficos explicativos sobre el intercambio térmico entre el exterior y el interior [133, 166].

### 3.4.6 CERMA

CERMA es una herramienta de proceso simplificado, al igual que CE3X realiza el balance mensual, creado por el Instituto Valenciano de la Edificación (IVE) en colaboración con ALTECYR para realizar el estudio de viviendas destinadas para uso residencial, diseñada para analizar una única zona térmica. Una característica que resalta de esta herramienta es que realiza una verificación de toda la normativa HE-0 hasta HE-5 simultánea, pudiendo realizar todas las comprobaciones en una sola herramienta sin tener que apoyarse en HULC y sirve como una herramienta muy útil para justificar el cumplimiento del CTE en proyectos de obra nueva [76].

Además, superando a CE3X, se realiza el cálculo del caudal de ventilación de forma automática siguiendo la normativa HS-3 que gestiona la calidad del aire interior. También posee una herramienta de cálculo de sombras y obstáculos que forma una recomendación de protección solar mejorando el comportamiento térmico de la vivienda y crea un informe gráfico que divide la demanda energética por elementos de la vivienda y asocia una recomendación de mejora, permitiendo ubicar de manera sencilla y visual los puntos de mayores pérdidas y organizar las mejoras por orden de impacto.

Los retos a los que se enfrenta esta plataforma son principalmente la competición con CE3X, al ser una herramienta con más complementos y una comunidad que la apoya y desarrolla. Por último, contiene restricciones similares a CE3X, como la posibilidad de estudiar únicamente una zona térmica, la sobresimplificación del cálculo de las sombras para algunos casos y las limitaciones de ventilación máxima que requiere migrar los datos a HULC [76].

Herramienta	HULC	Cypertherm HE Plus	SG SAVE	TeKton3D TK-CEEP	CE3X	CERMA
Cálculo	Dinámico horario	Dinámico horario + EnergyPlus	Dinámico horario + EnergyPlus	Dinámico horario + EnergyPlus	Simplificado mensual	Simplificado mensual
Usos	Residencial y terciario	Residencial y terciario	Residencial y terciario	Residencial y terciario	Residencial y obra nueva con su complemento	Residencial
Zonas de estudio	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1
Verificaciones CTE	HE-0, HE-1, HE-4 y HE-5	HE-0, HE-1, HE-4 y HE-5	HE-0, HE-1	HE-0, HE-1, HE-4 y HE-5	HE-0, HE-1	HE-0 - HE-5
Recomendación de mejora	No	Sí + mejora económica	Sí	Sí + mejora económica	Sí con acceso a plugins	Sí
Gráfico analítico	No	Detallado	Medio	Detallado	Básico	Detallado
Dificultad de uso	Alta	Alta	Media	Alta	Baja	Media

Table 3.2: Comparativa entre herramientas oficiales para la certificación energética de edificios en España. Fuente: Elaboración propia

## 3.5 Certificado energético

La certificación energética incluye el documento del certificado, la etiqueta de eficiencia energética resultante del cálculo energético, un informe sobre la evaluación energética del edificio, los documentos pertinentes para la evaluación del cálculo energético con los anexos que justifiquen la evaluación técnica del certificado y la recomendación de uso y mejora obligatoria desde la última actualización de la normativa. El certificado energético es el documento técnico donde se recogen las propiedades de la vivienda necesarias para definir la eficiencia energética de la misma, una vez declaradas las características que definen la vivienda se le asigna una calificación energética atendiendo a los niveles de la normativa española. El RD 390/2021 especifica la información que debe incluir el certificado energético.

### 3.5.1 Identificación del inmueble

La identificación del edificio o vivienda especifica la ubicación de la misma, la define según su uso, dependiendo de si está destinado a vivienda unifamiliar, piso, adosado o incluso si posee alguna protección histórica o arquitectónica que le pueda impedir hacer ciertas modificaciones al espacio. También incluye la referencia catastral, el año de construcción y la normativa vigente en su construcción, útil para estimar información sobre el inmueble según los requisitos de la normativa

aplicable. La identificación aparece en la portada del certificado [190].

**CERTIFICADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS**

**IDENTIFICACIÓN DEL EDIFICIO O DE LA PARTE QUE SE CERTIFICA:**

Nombre del edificio	Vivienda unifamiliar en Pobleja Valibona		
Dirección	Calle Luis Pérez 5		
Municipio	La Pobleja de Valibona	Código Postal	46058
Provincia	Valencia	Comunidad Autónoma	Comunidad Valenciana
Zona climática	C3	Año construcción	2008
Normativa vigente (construcción / rehabilitación)	C.T.E.		
Referencia/s catastrales	EG78900234YJ0045G		

**Tipo de edificio o parte del edificio que se certifica:**

<input type="checkbox"/> Edificio de nueva construcción	<input checked="" type="checkbox"/> Edificio Existente
<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Vivienda <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Unifamiliar</li> <li><input type="checkbox"/> Bloque</li> <li><input type="checkbox"/> Bloque completo</li> <li><input type="checkbox"/> Vivienda individual</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Tercario</li> <li><input type="checkbox"/> Edificio completo</li> <li><input type="checkbox"/> Local</li> </ul>

**DATOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR:**

Nombre y Apellidos	Certificador	NIF(NIE)	2
Razón social	Certificador	NIF	2
Domicilio	Plaza Nueva 3		
Municipio	Valencia	Código Postal	46001
Provincia	Valencia	Comunidad Autónoma	Comunidad Valenciana
e-mail:	certificador@certificador.es	Teléfono	0
Titulación habilitante según normativa vigente	Arquitecto		
Procedimiento reconocido de calificación energética utilizado y versión:	CEXv2.3		

**CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:**

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]	EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/m² año]

El técnico abajo firmante declara responsablemente que ha realizado la certificación energética del edificio o de la parte que se certifica de acuerdo con el procedimiento establecido por la normativa vigente y que son ciertos los datos que figuran en el presente documento, y sus anexos.

Fecha: 30/09/2016

Firma del técnico certificador

**Anexo I.** Descripción de las características energéticas del edificio.  
**Anexo II.** Calificación energética del edificio.  
**Anexo III.** Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética.  
**Anexo IV.** Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador.

Registro del Órgano Territorial Competente:

Figure 3.13: Ejemplo de certificado de eficiencia energética de vivienda unifamiliar [77].

### 3.5.2 Descripción de la envolvente térmica

Se especifican en el Anexo I del certificado energético todas las características energéticas de la envolvente que se encuentran en la división entre el habitáculo interior y el exterior incluyendo fachada, suelo, ventanas y demás elementos que se hayan empleado en el cálculo de la calificación energética. Para ello, se especifica el material, espesor y transmitancia térmica de cada uno de los elementos constructivos excepto para los huecos y ventanas que se describen por sus dimensiones, el tipo de protección y el factor solar. Una vez se han determinado todas las características de la envolvente térmica, es requisito la visita presencial de un técnico que revise la veracidad de la información aportada en el informe.

**ANEXO I  
DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DEL EDIFICIO**

En este apartado se describen las características energéticas del edificio, envolvente térmica, instalaciones, condiciones de funcionamiento y ocupación y demás datos utilizados para obtener la calificación energética del edificio.

**1. SUPERFICIE, IMAGEN Y SITUACIÓN**

Superficie habitable [m <sup>2</sup> ]	125.12
--	--------



**2. ENVOLVENTE TÉRMICA**

**Cerramientos opacos**

Nombre	Tipo	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> ·K]	Modo de obtención
Muro de fachada1	Fachada	12.5	0.73	Por defecto
Muro de fachada2	Fachada	15.0	0.73	Por defecto
Muro de fachada3	Fachada	15.0	0.73	Por defecto
Muro de fachada4	Fachada	25.0	0.73	Por defecto

**Huecos y lucernarios**

Nombre	Tipo	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> ·K]	Factor solar	Modo de obtención, Transmitancia	Modo de obtención, Factor solar
Hueco1	Hueco	12.5	2.92	0.25	Estimado	Estimado

Figure 3.14: Ejemplo de Anexo I – Descripción de la envolvente térmica energéticas del edificio [77].

### 3.5.3 Instalaciones térmicas

Las instalaciones térmicas incluyen los sistemas de climatización divididos en sistemas de calefacción y refrigeración y la producción de ACS. Su definición incluye el tipo de generador para calefacción con el rendimiento estacional, el consumo de energía, su potencia nominal y el tipo de energía que consume, el tipo de sistemas de refrigeración con su eficiencia energética (EER y SEER), la definición del sistema de producción de ACS y si existe, el sistema de ventilación o sistema de recuperación de calor. Su descripción se encuentra en el Anexo I después del apartado de la envolvente térmica.

### 3. INSTALACIONES TÉRMICAS

#### Generadores de calefacción

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Refrigeración	Bomba de Calor - Caudal Ref. Variable		209.9	Electricidad	Estimado
Calefacción y ACS	Bomba de Calor		163.9	Electricidad	Estimado
<b>TOTALES</b>	<b>Calefacción</b>				

Fecha  
Ref. Catastral

30/09/2016  
EG78900234YJ0045G

Página 2 de 6

#### Generadores de refrigeración

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Refrigeración	Bomba de Calor - Caudal Ref. Variable		155.4	Electricidad	Estimado
<b>TOTALES</b>	<b>Refrigeración</b>				

#### Instalaciones de Agua Caliente Sanitaria

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Demanda diaria de ACS a 60° (litros/día)		112.0			
Calefacción y ACS	Bomba de Calor		278.5	Electricidad	Estimado
<b>TOTALES</b>	<b>ACS</b>				

Figure 3.15: Ejemplo de Anexo I – Descripción de las instalaciones térmicas energéticas del edificio. [77]

### 3.5.4 Cálculo de consumo energético

Se debe incluir el procedimiento utilizado para generar el certificado energético (HULC, CYPETHERM HE Plus, SG SAVE, CE3, CE3X, CERMA) al igual que los resultados cuantitativos del cálculo energético. Se especifica en el Anexo II separando las emisiones de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·año) del consumo de energía primaria no renovable (kWh/m<sup>2</sup>·año). Además, dentro de cada apartado, se desglosa la cantidad perteneciente a cada grupo de consumidores (calefacción, refrigeración, ACS e iluminación), si el consumo proviene de una fuente eléctrica o si se usan otro tipo de combustibles y junto a cada resultado cuantitativo se le asigna una calificación asociada a su consumo.

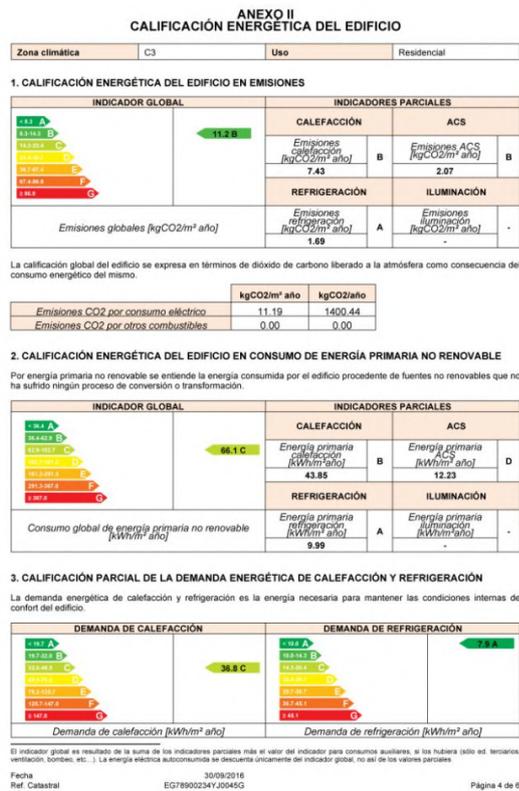


Figure 3.16: Ejemplo de Anexo II – Descripción del calculo energético del edificio [77].

### 3.5.5 Etiqueta energética

El distintivo oficial que acredita que la vivienda ha registrado el certificado energético ante el organismo autonómico competente y ha obtenido una calificación energética que cumple con la normativa española y, por lo tanto, se ajusta con las actualizaciones europeas. En la etiqueta se resume el contenido del certificado determinando el consumo general de energía primaria no renovable, las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al consumo y la letra resultante asociada a estos valores. Se incluye también la identificación del inmueble, la normativa que se ha utilizado para emitir el certificado y la validez del certificado que, habitualmente, se sitúa alrededor de 10 años.

**CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO TERMINADO ETIQUETA**

**DATOS DEL EDIFICIO**

Normativa vigente: construcción / rehabilitación

Tipo de edificio: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Municipio: \_\_\_\_\_

Referencia catastral: \_\_\_\_\_

C.P.: \_\_\_\_\_

C. Autónoma: \_\_\_\_\_

**ESCALA DE LA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA**

Calificación	Consumo de energía kWh / m <sup>2</sup> año	Emisiones kg CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup> año
<b>A</b> más eficiente		
<b>B</b>		
<b>C</b>		
<b>D</b>		
<b>E</b>		
<b>F</b>		
<b>G</b> menos eficiente		

**REGISTRO**

\_\_\_\_\_

Válido hasta dd/mm/aaaa

ESPAÑA  
Directiva 2010 / 31 / UE



Figure 3.17: Etiqueta oficial de calificación energética de edificios en España (Formato estándar RD 390/2021) [190].

### 3.5.6 Medidas de mejora

A partir del RD 390/2021 se exige incluir un apartado con recomendaciones con un equilibrio entre el coste y el resultado para mejorar la eficiencia energética en futuros proyectos, a excepción de aquellos proyectos que no puedan conseguir una mejora de la eficiencia energética. Esta medida busca estimular el proceso de mejora de eficiencia energética con recomendaciones que han de ser técnicamente viables. Se incluye en el Anexo III y cada recomendación ha de incorporar una descripción de la mejora con el efecto sobre la calificación, los factores económicos (ROI, coste-beneficio, amortización) y opcionalmente una descripción de la mejoría obtenida a nivel bienestar y confort de habitantes de la vivienda. En caso de incluir múltiples sugerencias se deben ordenar por prioridad.

**ANEXO III  
RECOMENDACIONES PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA**

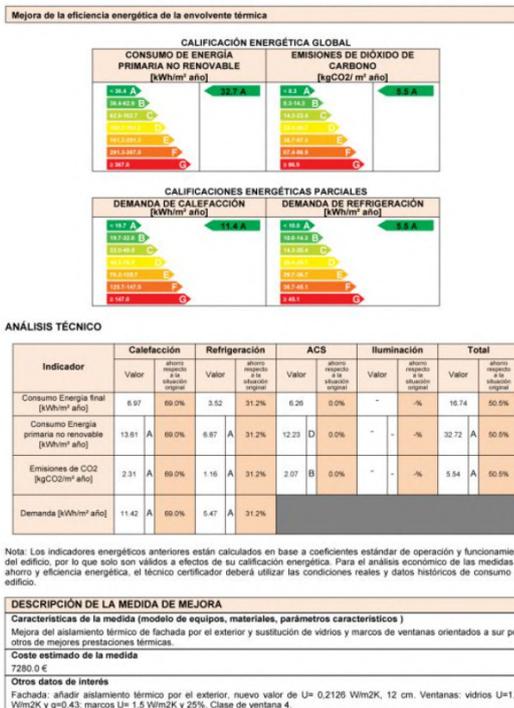


Figure 3.18: Ejemplo de Anexo III – Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética [77].

### 3.5.7 Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador

En el Anexo IV se incluye la fecha en la que el técnico competente autorizado realizó la visita obligatoria del inmueble y una descripción de todas las acciones que tomó el técnico certificador para verificar la correspondencia entre el informe y las características de la vivienda. También se puede incluir la documentación de la instalación de los sistemas de climatización, detalles de reformas previas y cualquier certificado o memoria que sea pertinente a la evaluación del certificado y con la verificación del técnico certificador.

**ANEXO IV  
PRUEBAS, COMPROBACIONES E INSPECCIONES REALIZADAS POR EL  
TÉCNICO CERTIFICADOR**

Se describen a continuación las pruebas, comprobaciones e inspecciones llevadas a cabo por el técnico certificador durante el proceso de toma de datos y de calificación de la eficiencia energética del edificio, con la finalidad de establecer la conformidad de la información de partida contenida en el certificado de eficiencia energética.

<b>Fecha de realización de la visita del técnico certificador</b>	29/4/2016
---	-----------

**COMENTARIOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR**

La visita se realizó el día 29 de Abril de 2016. Las tareas realizadas fueron: tomas de datos de mediciones de fachadas, carpinterías y vidrios, y elementos que arrojan sombra; toma de datos de instalaciones, y toma de fotografías. El propietario conserva proyecto de licencia de actividad del local para uso administrativo del cual se han obtenido datos para la certificación del mismo.

1. Equipo de bomba de calor ROCA York modelo BCHO-102 G/ BCI - 102.
2. Extractor ventilación en baño y en aseo.
3. Ventilación natural en zona común y en despacho.
4. Dimensiones de muros y particiones interiores. Distribución de espacios y superficies útiles habitables.

El archivo de cálculo registrado en el AVEN-IVACE contiene el análisis económico de las medidas de mejora donde se analiza la viabilidad económica de las mismas. Se informa al propietario de las subvenciones disponibles, si se decidiera a llevar a cabo actuaciones para la mejora de la calificación del inmueble.

**DOCUMENTACION ADJUNTA**

Etiqueta energética  
 Ficha catastral  
 Informe descriptivo de la medida de mejora: información técnica y en relación a coste-eficacia  
 Fotografías visita  
 Justificante de registro del CEE  
 Justificante de pago de tasa de registro

Figure 3.19: Ejemplo de Anexo IV – Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico [77].

Adicionalmente a toda la información detallada anteriormente, se deberá incluir documentación gráfica (planos y/o imágenes) que sirva como apoyo para mejorar la interpretación de la evaluación energética y facilitar la comprobación de veracidad de la misma, documentación técnica que justifiquen los cálculos realizados, el informe del certificado energético en formato XML y los ficheros adjuntos de cálculo.



# Chapter 4

## Estudio económico

El estudio económico se dedica a analizar una vivienda antigua de 90 m<sup>2</sup> de superficie, con una instalación de aislamiento térmico y sistemas de climatización deficiente, específicamente, se supone una instalación de caldera de gas natural y el habitáculo posee pérdidas energéticas en muros, cubierta y puentes térmicos en huecos. Estas características elevan la demanda energética de los sistemas de climatización y reducen el confort de la vivienda.

Se estudia la mejora del aislamiento térmico, reduciendo los puentes térmicos y creando una envolvente térmica uniforme y eficiente. A su vez, se estudia el efecto de sustituir la caldera de gas por otros sistemas de climatización, incluyendo el coste de inversión inicial y el cálculo operativo.

### 4.1 Aislamiento térmico

A continuación, se presenta el coste aproximado de la instalación completa desglosado en costes de material con un rango dependiente del grosor del material, coste de mano de obra y protección recomendada. Respecto a la mano de obra, se establece que para todas las técnicas que se utilizarán en este apartado (aislamiento interior para vivienda unifamiliar en edificio residencial), la mano de obra es de 6 €/m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia). Este cálculo surge de un análisis de casos reales donde el precio medio del aislante (lana mineral), incluyendo la instalación, cuesta 14 €/m<sup>2</sup> y el precio medio del aislante lana mineral oscila entre 6-8 €/m<sup>2</sup>, por lo tanto, la mano de obra se sitúa en 6 €/m<sup>2</sup>. También se incluye el precio de la instalación de pladur para proteger el material aislante, siendo este 36 €/m<sup>2</sup>, donde 30 €/m<sup>2</sup> corresponden a materiales de fijación, montantes, canales y el propio pladur, y 6 €/m<sup>2</sup> a la mano de obra. Evidentemente, esta generalización se realiza para simplificar el cálculo, pero cada compañía ofrecerá un rango de precios adaptado a sus servicios.

### 4.1.1 Coste de materiales y mano de obra

- **PUR proyectado:** El coste del material en formato de espuma oscila entre 10-15 €/m<sup>2</sup> para 3 cm de espesor (para climas templados), 15-25 €/m<sup>2</sup> para 5 cm de espesor (para climas fríos) y 25-40 €/m<sup>2</sup> para el panel rígido. Los costes añadidos serán la mano de obra, incluyendo un extra en caso de necesitar sanear, limpiar o aplicar protección sobre las superficies sensibles. Para la protección ignífuga no es necesario hacer ningún ajuste si el propio material ya ha certificado pertenecer a la clase B-s2,d0[5].
- **EPS:** El formato de panel semirrígido se puede encontrar en grosores desde 40 a 80 mm, oscilando entre 5 y 13 €/m<sup>2</sup>. El material pierde sus propiedades con la humedad, por lo tanto, se debe proteger. Más adelante se enumeran distintas vías constructivas para proteger el aislante, aunque la aplicación más habitual es la colocación de un revoco exterior, protegiendo el material del fuego y la humedad, encontrándose por 20-32 €/m<sup>2</sup> (material + instalación)[12].
- **XPS:** Incorpora el formato de panel rígido. Dependiendo del grosor, el precio aproximado del material aislante es 7-10 €/m<sup>2</sup> para un perfil de 40 mm, 10-12 €/m<sup>2</sup> para 50 mm y 12-15 €/m<sup>2</sup> para 60 mm. Al igual que el EPS, este también requiere una capa de protección para aumentar su durabilidad. Habitualmente es un material que se instala sobre la cubierta y se protege con una lámina de EPDM que sella el forjado, evitando filtraciones, y se fija con un lastre o losa filtrón que aporta peso sobre las planchas sirviendo también como protección contra la radiación UV. El precio del material de protección con su instalación es de 19 €/m<sup>2</sup>[13].
- **Lana mineral:** Los formatos son lana de roca, un panel de 40 mm de espesor oscilando entre 4-6 €/m<sup>2</sup>, protegido por un sistema de trasdosado interior de pladur que ronda 30-40 €/m<sup>2</sup>. La lana mineral tiene muy buen comportamiento al fuego (Euroclase A1) y el trasdosado posee una Euroclase A2. Por lo tanto, solo es necesario tener en cuenta que requiere una barrera de vapor en caso de ser una cubierta fría[25, 16].
- **Celulosa insuflada:** Este material se instala a granel con una máquina de insuflado. Este formato permite fugas, por lo tanto, se protege con una lámina freno-vapor variable en la parte caliente y se sella con una cámara cerrada consiguiendo una reacción al fuego B-s2,d0[1]. Además, puede necesitar otra protección externa ya que solo es capaz de admitir un 15% de agua antes de perder sus propiedades térmicas. El material aislante tiene un precio de 15-35 €/m<sup>2</sup>.

Sistema	Conductividad térmica $\lambda$ (W/m·K)	Reacción al fuego	Factor de difusión $\mu_{H_2O}$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Coste material (€/m <sup>2</sup> )
PUR proyectado	0.026	F	40 – 100	30 – 60	10 – 20
Panel PUR	0.024	C-s3,d0	70 – 120	30 – 40	20 – 45
EPS	0.029 – 0.038	E	30 – 70	15 – 25	5 – 13
XPS	0.029 – 0.04	E	150 – 200	30 – 45	7 – 15
Lana mineral	0.032 – 0.04	A1	1 – 2	25 – 140	4 – 12
Celulosa insuflada	0.04	B-s2,d0	1 – 2	45 – 60	15 – 35

Table 4.1: Comparativa técnica y económica de sistemas de aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que en este estudio económico se integran únicamente soluciones de aislamiento interior por ser soluciones aplicadas a una única vivienda. En el caso de tener la oportunidad de mejorar el aislamiento térmico de todo el edificio, se recomienda la instalación de SATE, el cual ofrece una envolvente térmica completamente uniforme a lo largo de la fachada del edificio, con un coste de 60-80 €/m<sup>2</sup> con instalación de EPS 60mm y 80-100 €/m<sup>2</sup> con lana de roca [90].

El ahorro energético de la mejora de aislamiento térmico proviene de la estabilidad térmica que aporta la envolvente a la hora de reducir las pérdidas energéticas. La instalación de materiales como EPS y XPS aporta una reducción de la demanda de 30-40 % [58]. Para una vivienda con caldera de gas y una demanda energética de 88,2 kWh/m<sup>2</sup> al año, se resume en un ahorro de 35,28 kWh/m<sup>2</sup> anual, equivalente a 266 € de ahorro anual siguiendo la siguiente metodología de cálculo:

- Ahorro energético: 35,28 kWh/m<sup>2</sup> · año
- Superficie útil de la vivienda: 90 m<sup>2</sup>
- Rendimiento de la caldera de gas: 0,85 [70]
- Factor de conversión: 1 m<sup>3</sup> gas = 10,7 kWh [67]
- Precio del gas: 0,0712 €/kWh (con IVA) [117]
- Término fijo anual: 82,20 € [70]

## 1. Demanda energética total anual:

$$Q_{\text{demanda}} = 35,28 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} \cdot 90 \text{ m}^2 = 3.175,2 \text{ kWh/año} \quad (4.1)$$

## 2. Energía final ahorrada:

$$Q_{\text{final}} = \frac{Q_{\text{demanda}}}{\eta} = \frac{3.175,2}{0,85} = 3.735,5 \text{ kWh/año} \quad (4.2)$$

### 3. Volumen de gas ahorrado:

$$V_{\text{gas}} = \frac{Q_{\text{final}}}{10,7} = \frac{3.735,5}{10,7} \approx 349 \text{ m}^3/\text{año} \quad (4.3)$$

### 4. Ahorro de gas natural:

$$C_{\text{gas}} = Q_{\text{final}} \cdot P_{\text{gas}} = 3.735,5 \cdot 0,0712 = 266,0 \text{ €/año} \quad (4.4)$$

En términos de ROI, todos los resultados serán menores que la vida útil de la propia instalación (>30 años), por lo tanto, la duda se centra en el tipo de aislamiento a instalar. Para ello, se debe tener en cuenta el coste de instalación y las protecciones necesarias para cada tipo.

#### 4.1.2 Protección y formato de instalación

A continuación se resumen los diferentes tipos de protecciones más comunes para aislamiento térmico.

Tipo de protección	Coste del material y mano de obra	Usos
Protección exterior de revoco monocapa con mortero	20 – 32 €/m <sup>2</sup>	Aislamiento exterior con SATE de EPS, XPS o PUR [197]
Trasdosado de Pladur de espesor 98 mm	35 – 50 €/m <sup>2</sup>	Protección de aislamiento térmico y acústico interior de lana mineral y denim reciclado [1]
Barrera de vapor Papel Kraft (Polietileno)	5 – 10 €/m <sup>2</sup>	Protección interior y exterior para superficies frías para control de humedad [31]
Lámina EPDM de espesor 1,2 mm (especial para cubiertas)	9 – 12 €/m <sup>2</sup>	Protección exterior de impermeabilización de cubierta invertida (XPS o PUR) [5]
Losa filtrón drenante de espesor 25 mm	20 – 25 €/m <sup>2</sup>	Sistema de drenaje y protección del aislamiento, especial para cubiertas [22]
Subestructura de aluminio con anclajes	55 – 70 €/m <sup>2</sup>	Estructura de fachada ventilada [6]

Table 4.2: Resumen de sistemas de protección complementarios para aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia.

El insuflado en cámara representa la opción más económica y con menor modificación del habitáculo en el proceso de instalación, también es la opción que menor aislamiento proporciona y con menor uniformidad en la aplicación de material. Representa una medida que ayuda a reducir la demanda energética y aumentar el confort, aunque únicamente se recomienda para casos en los que otras aplicaciones no sean posibles o en huecos de difícil acceso. Los materiales como XPS y EPS proporcionan el mayor ahorro energético y son la opción con mayor aplicación en reformas integrales por su efectividad en el aislamiento con un espesor reducido, un factor que en las reformas cobra gran importancia por la prioridad de maximizar el espacio habitable. Por último, las lanas minerales ofrecen el mejor aislamiento acústico y compiten en aislamiento térmico con los materiales XPS/EPS con el beneficio de poseer un mejor comportamiento al fuego.

## 4.2 Sistemas de climatización

Este estudio analiza la clasificación de los sistemas de climatización, tanto tradicionales como modernos, describiendo el rendimiento, coste y comparando las aplicaciones de cada alternativa dependiendo de las recomendaciones de cada zona climática, tratando de identificar las alternativas que ofrezcan una eficiencia energética alineada con los objetivos europeos a la vez que mantengan las condiciones de confort de la vivienda.

Para realizar una comparación equitativa de los sistemas de climatización es necesario conocer la demanda térmica que presenta el caso de estudio. El estudio de MITMA [60] resume la demanda por zonas climáticas con la premisa de mantener las condiciones de confort en la vivienda. Los resultados establecen una demanda media de 114,4 kWh/m<sup>2</sup>·año para la zona continental, 88,2 kWh/m<sup>2</sup>·año en la zona del Atlántico norte y 44,1 kWh/m<sup>2</sup>·año en las provincias cercanas al mediterráneo. Estos valores permiten establecer la comparativa para que cada sistema de climatización cubra la demanda energética. Este estudio incluye una vivienda de superficie 90 m<sup>2</sup>, obteniendo unos valores de 10.296 kWh/año en zonas frías, 7.938 kWh/año en las zonas templadas y 3.969 kWh/año en las zonas cálidas. Por lo tanto, se establecen como demandas energéticas para la comparación de 3.000 kWh/año a 6.000 kWh/año en zonas cálidas, hasta 9.000 kWh/año en zonas templadas y hasta 12.000 kWh/año en zonas frías.

Sistema	Inversión inicial (€)	Consumo anual (kWh)	Coste anual (€)	Eficiencia (%)	Ahorro anual (€)	ROI
Caldera de gas natural	1.600 - 2.500	2.777,78 - 11.111,11	264,11 - 809,91	85 - 110	-	-
Caldera de gasóleo	1.300 - 2.500	3.157 - 12.351	344,4 - 1.389,1	90 - 97	-80,29 - -761,12	N/D
Caldera de biomasa (pellets)	3.758	3.000 - 12.000	388 - 1.307	90 - 95	239,98	15,66
Radiador eléctrico (resistencia seca)	900 - 1.080	3.504	691,2	100	-63,22	N/D
Radiador eléctrico (Fluido térmico)	480 - 600	3.164,55	624	90	66,31	9,05
Radiador eléctrico (Cerámico)	540 - 660	2.788,6	549,6	85	78,38	7,66
Suelo radiante eléctrico	3.600 - 6.300	3.000 - 12.000	861 - 3.444	100 - 105	-233,02 - -2.816,02	N/D
Suelo radiante hidráulico	4.500 - 9.000	750 - 3.000	191 - 907	350 - 500	436,98	12,44
Sistemas Split	1.169,70	4.380 - 6.570	648 - 972	300 - 450	-20,02	N/D
Sistemas Multisplit	1.500	4.197,5 - 6.168,5	621,6 - 913,2	320 - 470	6,38	235,13
Sistema de conductos	5.000	3.942 - 5.657,5	583,2 - 837,6	350 - 500	44,78	111,64
Sistema Inverter	1.500	3.285 - 4.416,5	486 - 652,8	450 - 600	141,98	10,56
Bomba de calor aire-agua convencional	6.500	5.186,65	766,8	380	43,11	150,78
Bomba de calor aire-agua con EVI	8.400	4.693,9	696	420	113,91	73,74
Bomba de calor aire-agua con R32	7.800	4.927,5	729,6	400	80,31	97,12
Bomba de calor aire-agua con R290	9.200	4.380	648	450	161,91	56,82
Aeroterminia con suelo radiante	13.000 - 22.000	667 - 3.429	100 - 514	420 - 550	559,91	23,22
Geoterminia con suelo radiante	23.400	2.000	400	450	659,91	35,46

Table 4.3: Tabla comparativa de sistemas de climatización. Fuente: Elaboración propia.

Los datos muestran la correlación entre la inversión y el ahorro energético, donde las tecnologías con mayor eficiencia como la aeroterminia y geoterminia también representan las opciones de mayor inversión inicial. Por otro lado, los sistemas con mayor consumo energético suponen una inversión inicial menor, aunque se convierten en un gasto añadido a largo plazo. Cabe mencionar que las tecnologías más novedosas como la aeroterminia o la geoterminia, aunque en este estudio se analice la posibilidad de combinarlas con diferentes sistemas de distribución, en la realidad, se suelen instalar, en el caso de la aeroterminia, la unidad con ACS incluido en la mayoría de casos y suelo radiante. La razón es simple: un sistema eficiente no debe colocarse con otro sistema que lo limite, porque anula su eficiencia, como hemos

podido observar en los casos anteriores. Es importante mencionar que a la hora de realizar el estudio se ha escogido una demanda energética personalizada a cada tecnología, por ello, en la comparativa final, las tecnologías eléctricas obtienen un ROI menor, de esta manera, la comparativa final sirve para unificar todos los datos del estudio. Las calderas de biomasa suponen una inversión inicial media, alrededor de 3.800 €, aunque la necesidad de gestionar el almacenamiento de pellets limita la viabilidad para viviendas con falta de espacio para su almacenamiento. Los sistemas split ofrecen una mayor eficiencia con una inversión inicial baja, el sistema de distribución de aire forzado puede ser útil para climas templados pero se reduce su confort en zonas más frías o cálidas, aumentando también su demanda.

El uso cada vez más extendido del suelo radiante se debe al confort que aporta el sistema de distribución comparado con el resto de tecnologías, aunque en el papel los cálculos de consumo energético sean similares. En la práctica, instalar suelo radiante genera una mejor distribución del calor y la relación con el cuerpo humano crea una sensación térmica homogénea, mientras que unidades como los radiadores convencionales o split ofrecen menor confort y, en consecuencia, elevan la demanda energética. Por ello, se ha creado una tabla con el resultado conjunto de varios estudios que analizan el confort de cada tecnología, evaluando con la opinión personal cada apartado con una puntuación de 1 a 5.

Sistema	Homogeneidad térmica	Tiempo de respuesta	Ruido	Estabilidad	Confort	Nota final
Suelo radiante	5	2	5	5	5	4.9
Radiadores a baja temperatura	4	3	5	4	4	4.2
Fan-coils	3	4	3	2	4	3.7
Radiadores convencionales	2	4	3	2	2	3.2
Radiadores eléctricos	1	4	3	1	2	2.4

Table 4.4: Evaluación del confort térmico percibido por sistema de climatización (escala 1–5).

El retorno de inversión es otro punto a comentar, donde las opciones con menor funcionalidad basada en el análisis, dan como resultado un ROI menor. Los radiadores eléctricos suponen una inversión inicial pequeña comparada con el ahorro que producen. Esto ocurre porque no son sistemas diseñados para climatizar la vivienda sin el apoyo de otro sistema base. Aun así, los números no dominan la decisión, ya que ofrecen un confort técnico bajo, resultando en una vivienda con fallos de climatización y un mayor gasto para compensar la falta.

Por otro lado, las tecnologías más prometedoras como la aerotermia y la geotermia, demuestran un ROI mayor al esperado. La media de retorno de inversión de un proyecto de aerotermia habitual se sitúa entre 8 y 10 años. El dato obtenido

en el cálculo difiere de la realidad por las siguientes razones:

- El estudio emplea un cálculo que comienza con un valor de demanda energética y un cálculo simple ajustado a la eficiencia de cada sistema. Para realizar un cálculo más ajustado a la realidad, se deberían de describir con mayor detalle la demanda energética de cada tecnología y realizar un estudio en profundidad de los costes operativos que involucran cada tecnología.
- Cuanto mayor sea la vivienda, menor será el tiempo en recuperar la inversión, ya que la inversión inicial no conlleva un crecimiento lineal respecto al tamaño de la vivienda, sino que la mayoría de componentes son independientes al tamaño. A mayor superficie, mayor será el ahorro energético porque sube la demanda térmica.
- Los cálculos de este estudio incluyen una vivienda antigua de 90 m<sup>2</sup> con déficit de aislamiento térmico y baja calificación energética, la instalación de sistemas eficientes, deberá de ir acompañada de una mejora del aislamiento, por lo tanto, para mejorar el estudio se debería de calcular el efecto del consumo sobre una mejora del aislamiento térmico y sus sistemas de climatización en conjunto.
- No se aplican ninguna de las subvenciones que se ofrecen por instalar sistemas de energía renovable.
- No se tienen en cuenta factores como la sensación térmica a la hora de realizar el cálculo de la demanda térmica. Cuando aumenta el confort térmico de una tecnología, automáticamente disminuye su demanda energética, independientemente de su eficiencia.

También se ha comprobado la razón por la que los sistemas no rentables están cayendo en desuso. Hay un claro movimiento hacia la sostenibilidad y el ahorro energético que hace que estas tecnologías pierdan terreno. Por ello, una menor eficiencia, la emisión de gases o un alto coste operativo son factores decisivos para el futuro de la tecnología.

Las calderas de gas natural, gasóleo y biomasa son alternativas que se considerarán en el futuro únicamente para casos en los que la aerotermia y otras soluciones eficientes no sean factibles.

# Chapter 5

## Conclusión

El estudio de mejoras de eficiencia energética en la vivienda está motivado por una deficiencia en la eficiencia energética del parque de viviendas en España con 4,64 millones de inmuebles que poseen una calificación inferior a E, esto equivale al 79,5 % [165] que poseen una calificación inferior a la nueva estrategia europea para limitar la demanda energética y reducir el consumo de fuentes de energía primaria no renovable con la actualización del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE (actualizado con el Real Decreto 732/2019 [29]). La integración de soluciones eficientes y energías renovables es el objetivo español alineado con las directivas europeas, ajustado por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) que establece la renovación de 1,2 millones de viviendas [161]. Se sustituirán los sistemas fósiles por bombas de calor, apoyado por ayudas y subvenciones como PREE 5000, deducciones en el IRPF o bonificaciones en el Impuesto sobre Bienes Inmuebles (IBI).

Bajo estas condiciones, es importante continuar el estudio de las medidas pasivas y activas como el aislamiento térmico y los sistemas de climatización, respectivamente. Este trabajo sitúa el marco político que actúa como motor de cambio (certificado energético) y las opciones disponibles de mejora de eficiencia energética y su viabilidad.

El análisis sobre el aislamiento térmico interior demuestra una reducción de entre 30 - 40 % de la demanda energética con la instalación por medio de paneles EPS o XPS, una solución que ofrece gran capacidad de aislamiento térmico. Para viviendas donde sea necesario instalar aislamiento acústico, se recomienda la instalación de lana de roca o lana de vidrio, la cual ofrece propiedades térmicas ligeramente menores al EPS, pero añade aislamiento acústico de 25 dB y mejor comportamiento al fuego. En el aspecto económico la instalación de EPS es más barata que la lana mineral.

El principal problema de la instalación de aislamiento térmico en el interior de la vivienda es la aparición de puentes térmicos, zonas frías y huecos que rep-

resentan grandes pérdidas energéticas, causadas por falta de homogeneidad en el aislamiento. Por ello, es importante mencionar que la mejor alternativa es la instalación de SATE, un sistema de aislamiento de fachada que crea una envolvente homogénea en todo el edificio y minimiza las pérdidas energéticas en la fachada. La limitación de esta solución es la inversión inicial elevada y la necesidad de modificar la fachada de todo el edificio, con la premisa de que todos los inquilinos estén de acuerdo con la reforma.

Tanto el aislamiento interior como exterior poseen períodos de retorno inferiores a la vida útil del material, esto significa que todas las soluciones generan el ahorro suficiente para amortizar la inversión. Además, aumenta la estabilidad de la temperatura en el interior de la vivienda, reduce las condensaciones y las emisiones de CO<sub>2</sub> con la bajada de la demanda térmica, aunque el factor más importante es el aumento de la sensación de confort para los habitantes de la vivienda.

Los sistemas de climatización son la medida activa con mayor influencia sobre la demanda energética y la calificación energética. Las bombas de calor han sido la tecnología emergente con mayor adopción gracias a sus niveles de eficiencia energética (COP mínimo 2,5 en climas fríos y COP máximo 5,5 en climas cálidos), apoyado por el uso extendido de aerotermia combinada con suelo radiante, aporta un ahorro energético significativo y se considera energía renovable (siempre que el COP supere 2,5) ayudando a la mejora de la calificación energética de la vivienda.

Históricamente, las calderas de gas natural y gasóleo han representado las soluciones de uso predominante en el parque residencial. Su inversión inicial media junto con la accesibilidad del combustible por la red de distribución creó el ecosistema idóneo para que la tecnología se disparase en uso. Actualmente, su baja eficiencia (incluidas las calderas de condensación que no superan el 150 %) y el uso del combustible fósil son insuficientes bajo las actualizaciones del marco normativo. Los sistemas eléctricos representan una tecnología fácil y rápida de instalar, barata y con una generación de calor rápida, aunque su aplicación queda limitada a sistemas de apoyo, recomendada en climas templados ya que la generación de calor carece de la inercia térmica capaz de aportar las alternativas renovables.

La geotermia es una tecnología con mayores capacidades que la aerotermia gracias a la estabilidad térmica que aporta el subsuelo pero, también se enfrenta a una inversión inicial mayor y se dificulta su aplicación en entornos urbanísticos por su instalación subterránea. Las tecnologías con uso de combustibles fósiles se eliminarán gradualmente debido a los objetivos de descarbonización y por su falta de eficiencia, mientras que las soluciones eléctricas como radiadores eléctricos suponen una alternativa de apoyo por su minimizar la inversión inicial y proporcionar un confort técnico inferior a la aerotermia con suelo radiante que emite el calor de manera homogénea a lo largo de la superficie. Existe un punto negativo para instalaciones como la aerotermia; este trata del funcionamiento óptimo cuando el

circuito de agua opera a baja temperatura; demasiado baja y comienza a condensar, reduce su eficiencia y aumenta el consumo. Para evitarlo, se debe acompañar la instalación con una envolvente térmica que aporte la estabilidad térmica que maximice la operabilidad de la bomba de calor.

En definitiva, las bombas de calor son la alternativa con mayor capacidad de alinearse con los nuevos objetivos de eficiencia y eliminación de combustibles fósiles (CTE y PNIEC), una alternativa que ayudada por las subvenciones, cobra una rentabilidad con una accesibilidad y ahorro competitivo. En casos de climas fríos, se pueden incorporar el uso de refrigerantes o la inyección de vapor, que mantienen los niveles de eficiencia estables y amplían el rango de temperaturas con un funcionamiento óptimo. El uso de suelo radiante hidráulico es clave al combinarlo con las tecnologías emergentes (aerotermia y geotermia) porque reduce el gasto energético significativamente con una temperatura del agua superior a otros sistemas de climatización, evitando problemas de condensación y aumentando la eficiencia del sistema en operaciones a baja temperatura. Además, reparte el calor uniformemente a lo largo de la superficie, introduciendo la importancia del confort técnico como dato a considerar en la elección del sistema de climatización, creando así una evolución hacia la eficiencia y el confort técnico, alejándose de los combustibles fósiles.

El certificado energético es la herramienta que permite realizar un seguimiento sobre la calificación energética del parque residencial y ajustar el motor del desarrollo para cumplir con los objetivos marcados por la Unión Europea con la prohibición de la venta de edificios residenciales con una calificación inferior a la letra E a partir de 2030 y D a partir de 2033. El certificado asegura un documento actualizado cada 10 años (5 años para calificaciones bajas G) con un cálculo estandarizado por herramientas como HULC, CE3x o CERMA.

La disponibilidad del cálculo energético permite declarar las medidas para mejorar la eficiencia energética y resume los resultados en un documento que debe existir para cualquier transacción realizada con el edificio o vivienda. Esta herramienta también permite crear un historial de mejora de la eficiencia para acceder a las subvenciones que ayudan a incorporar soluciones tecnológicas con una inversión inicial superior, como las deducciones en el IRPF, el programa PREE, bonificaciones en el IBI y otras subvenciones declaradas en el Real Decreto 477/2021 sobre la instalación de sistemas renovables. Por último, el estandarizado del cálculo y formato XML de los archivos permite almacenarlos en una base de datos homogénea que ayuda a realizar un seguimiento del estado actual del parque residencial y ajustar la prioridad de mejora dependiendo de las subvenciones y el distrito.

En definitiva, la rehabilitación energética con la mejora de la envolvente térmica y la instalación de sistemas de climatización eficientes y separados del uso de

combustibles fósiles aporta resultados de ahorro energético significativos, aumento del confort técnico y se alinea con las directivas europeas de desarrollo que promueven la urgencia de la mejora del parque residencial, el cual en España mantiene una calificación deficiente. Las políticas se han ajustado creando restricciones y ayudas que estimulan el avance y el certificado energético ofrece la herramienta de seguimiento para cumplir con los objetivos que solo saldrán adelante con un compromiso social y una visión clara de los pasos necesarios. Esta visión se deberá obtener mediante la continuidad del estudio y aportando información clara sobre las soluciones de mejora de eficiencia energética en viviendas que arroje luz a las mejores alternativas para acompañar el desarrollo.

# Appendix A

## Alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El estudio de medidas de eficiencia energética mediante la rehabilitación energética busca reducir el consumo energético que representa el parque residencial y se alinea directamente con varios ODS. Su alineación se identifica por las medidas de estudio y el impacto que genera la reducción de la demanda energética.

### **A.1 ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna**

Como se ha mencionado previamente, el objetivo del proyecto se centra en reducir la demanda energética representada por la vivienda a través de la mejora del aislamiento térmico, y la instalación de sistemas de climatización eficientes. El uso de tecnologías de aerotermia, geotermia y la combinación con sistemas de distribución como el suelo radiante tienen un impacto directo sobre las necesidades energéticas para climatizar la vivienda.

El estudio económico demuestra que, a pesar de la inversión inicial que representan estas alternativas sostenibles, el ahorro energético que representan junto con las subvenciones y ayudas que estimulan la adopción de estas medidas aumentan la accesibilidad económica a una energía sostenible y asequible. El uso de sistemas con altos niveles de eficiencia, y adaptaciones para diferentes climas que permiten mantener la eficiencia, asegura un suministro sostenible, moderno y seguro, reduciendo no solo la demanda energética sino el uso de combustibles fósiles.

El objetivo se cumple con la alineación del proyecto con la Directiva Europea de Eficiencia Energética (EPBD) y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) adoptado por España para cumplir con las medidas del uso de energías renovables, reducción de consumo de combustibles fósiles y el uso de tecnologías eficientes.

## A.2 ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles

Las ciudades obtienen gran parte de la demanda energética y la consecuente emisión de gases de efecto invernadero de un parque residencial con una calificación energética media inferior a "E". La rehabilitación energética busca remediarlo con la instalación de sistemas de climatización eficientes y creando una envolvente térmica que aumente la estabilidad térmica en la vivienda obteniendo un modelo sostenible con los siguientes objetivos:

- **Reducción del impacto ambiental urbano:** La reducción de la demanda energética y el uso de energías limpias disminuyen las emisiones asociadas a los sistemas de climatización.
- **Aumento en la resiliencia frente a climas adversos:** Una envolvente térmica homogénea y eficiente es capaz de mantener las condiciones de confort en la vivienda y mantiene una estabilidad térmica importante en climas adversos con posibles olas de calor o frío.

La reducción del gasto energético permite combatir la pobreza energética para viviendas antiguas con baja calificación energética y mejora el bienestar de las personas creando hogares cómodos sin representar un gasto desproporcionado.

## A.3 ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles

La sostenibilidad permanece como prioridad a lo largo del proyecto, informando sobre alternativas naturales y ecológicas de aislamiento térmico, como la lana mineral, que reduce el impacto medioambiental en su fabricación. Otras opciones, como el denim reciclado o el corcho permiten aprovechar materiales reciclados para dar una segunda vida a materiales que pueden crear soluciones duraderas al final de su vida útil.

El proyecto tiene como objetivo reducir el consumo por medio de un cambio fundamental en la concepción de la rehabilitación, estableciendo como prioridad crear una vivienda con una envolvente térmica sin pérdidas térmicas, desarrolladas con un impacto ambiental reducido. Apoyado por sistemas de climatización de alta eficiencia con un consumo sostenible.

## A.4 ODS 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos

Los objetivos de las directivas europeas establecen las mejoras necesarias y se apoyan en restricciones aplicadas a partir del 2030, la urgencia de esta medida pone en contexto la importancia de promover el uso de sistemas de climatización eficientes y una envolvente térmica que reduzca la huella de carbono procedente de las viviendas.

El estudio ofrece medidas efectivas que reducen el consumo energético procedente de los sistemas de climatización y promueve el uso de energías limpias y eficientes que tienen un impacto directo en la reducción de emisión de gases de efecto invernadero. Estas medidas ofrecen una solución para reducir los efectos del cambio climático y generan una estabilidad térmica y confort técnico en la vivienda que permiten aislarse de los efectos del cambio climático mientras estos perduren.

Al reducir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, el proyecto apoya los esfuerzos globales contra el cambio climático.



# Bibliography

- [1] Aislamiento con celulosa - precios y recomendaciones. <https://habitissimo.es/precios/aislamiento-con-celulosa>.
- [2] Aislamiento multicapa. <https://arelux.com/articulos/aislamiento-multicapa/>.
- [3] Aislamiento térmico según zonas climáticas. <https://www.saterhonatherm.com/blog/aislamiento-termico-segun-zonas-climaticas/>.
- [4] Boe a-2021-8447: nuevos criterios de adjudicación. [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447).
- [5] Calcular precio €/m<sup>2</sup> de espuma de poliuretano proyectado. <https://proyectadosdepoliuretano.com/aislamiento/calcular-precio-m2-de-espuma-de-poliuretano-proyectado/>.
- [6] Capas funcionales de una fachada ventilada. <https://blog.mannigroup.com/es-es/isopan/capas-funcionales-de-una-fachada-ventilada>.
- [7] Caso práctico: ahorro energético en una comunidad. <https://es.linkedin.com/pulse/caso-pr%C3%A1ctico-ahorro-energ%C3%A9tico-en-una-comunidad-de-propietarios-xgqof>.
- [8] Directiva 2010/31/ue sobre edificios de consumo casi nulo. [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-18528](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-18528).
- [9] El aislamiento por insuflado es una buena opción para viviendas antiguas. <https://insuflatec.es/el-aislamiento-por-insuflado-es-una-buena-opcion-para-viviendas-antiguas/>.
- [10] Fachada ventilada: funcionamiento y ventajas. <https://www.cupapizarras.com/es/actualidad/fachada-ventilada-funcionamiento-ventajas/>.

- [11] Fachadas sate: qué es. <https://reformasintegrales10.com/aislamiento/fachadas-sate-que-es/>.
- [12] Globalepd en 16783-001: Eps. [https://www.aenor.com/Producto\\_DAP\\_pdf/DAP-GlobalEPD-EN-16783-001Aislamiento-térmico-de-poliestireno-expandido.pdf](https://www.aenor.com/Producto_DAP_pdf/DAP-GlobalEPD-EN-16783-001Aislamiento-térmico-de-poliestireno-expandido.pdf).
- [13] Globalepd en 16783-002: Xps. [https://www.aenor.com/Producto\\_DAP\\_pdf/DAP-GlobalEPD-EN-16783-002-Aislamiento-térmico-de-poliestireno-extruido.pdf](https://www.aenor.com/Producto_DAP_pdf/DAP-GlobalEPD-EN-16783-002-Aislamiento-térmico-de-poliestireno-extruido.pdf).
- [14] Guía idae: introducción y duración del aislamiento. <https://fr.scribd.com/document/47175071/Guia-IDAE>.
- [15] Insuflado para aislamiento térmico. <https://www.certicalia.com/blog/aislamiento-por-insuflado>.
- [16] Isover glass wool environmental product declaration. [https://www.isover.es/sites/isover.es/files/assets/documents/epd\\_isover\\_lana\\_vidrio.pdf](https://www.isover.es/sites/isover.es/files/assets/documents/epd_isover_lana_vidrio.pdf).
- [17] Ley 7/2021 de cambio climático y transición energética. <https://www.pactomundial.org/leyes-directivas-normativas-sostenibilidad/ley-7-2021-de-20-de-mayo-de-cambio-climatico-y-transicion-energetica/>.
- [18] Ley de certificación de eficiencia energética de edificios. <https://www.e4e-soluciones.com/blog-eficiencia-energetica/ley-de-certificacion-de-eficiencia-energetica-de-los-edificios>.
- [19] Medidas del gobierno para ahorrar energía con poliuretano. <https://aislaconpoliuretano.com/medidas-del-gobierno-para-ahorrar-energia/>.
- [20] Nueva directiva europea de eficiencia energética de edificios. <https://www.aisla.org/nueva-directiva-europea-de-eficiencia-energetica-de-edificios-un-nuevo-imp>
- [21] Plan nacional integrado de energía y clima (pniec). <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html>.
- [22] Poliestireno expandido (eps): propiedades y aplicaciones. <https://knauf-industries.es/poliestireno-expandido-que-es-y-como-se-hace/>.

- [23] Renovation wave — energy-efficient buildings. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en).
- [24] Resumen modificaciones del cte. <https://www.bmigroup.com/es/blog/resumen-de-las-modificaciones-del-cte/>.
- [25] Rockwool stone wool environmental product declaration. <https://www.rockwool.com/siteassets/o2-rockwool/documentation/epd/rockwool-stone-wool-environmental-product-declaration-epd.pdf>.
- [26] Using thermal imaging ... as a way to tackle fuel poverty. <https://www.cervantesvirtual.com/obra/using-thermal-imaging-to-assess-the-performance-of-thermal-insulation-of-a-build>
- [27] ¿qué es aislamiento reflexivo? <https://www.iberdrola.es/eu/blog/energia/que-es-aislamiento-reflexivo>.
- [28] K-13 cellulose insulation technical data. <https://www.spray-on.com/resources/technical-data/K13-Tech-Data-Sheet.pdf>, 2018.
- [29] Real decreto 732/2019 que modifica el cte. <https://www.arquitecturasostenible.org/2020/01/01/real-decreto-732-2019-de-20-de-diciembre-por-el-que-se-modifica-el-codigo-tecnico-2020>.
- [30] Código técnico de la edificación - documento básico he1: Condiciones para el control de la demanda energética, 2021.
- [31] Código técnico de la edificación - documento básico hs1: Protección frente a la humedad, 2021.
- [32] Real decreto 853/2021, de 5 de octubre. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-16233>, 2021.
- [33] Polyurethane thermal insulation board – v lar panel pu, 2022. <https://en.renovablesverdes.com/Technical-properties-of-XPS-insulation%3A-thermal-performance-and-key-features/>, 2022.
- [34] Ayudas a la rehabilitación energética en la comunidad de madrid. <https://www.comunidad.madrid/servicios/vivienda/ayudas-actuaciones-rehabilitacion-energetica-edificios-residenciales-viviendas-p> 2023.

- [35] Ayudas para instalaciones de energías renovables térmicas en sectores productivos. <https://ayudasenergiadae.es/renovables-termicas/>, 2023.
- [36] Climafoam® xps board – hoja técnica. [https://pim.knaufinsulation.com/files/download/CLIMAFOAM\\_XPS\\_BOARD\\_datasheet.pdf](https://pim.knaufinsulation.com/files/download/CLIMAFOAM_XPS_BOARD_datasheet.pdf), 2023.
- [37] Conoce las ayudas europeas para la rehabilitación de viviendas - prtr. <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/conoce-ayudas-europeas-rehabilitacion-viviendas-prtr>, 2023.
- [38] Plan eco vivienda - junta de andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/fomentoarticulaciondelterritorioyvivienda/areas/vivienda-rehabilitacion/plan-eco-vivienda/paginas/plan-eco-viv-p4.html>, 2023.
- [39] Programa pree comunitat valenciana. [https://www.gva.es/es/inicio/procedimientos?id\\_proc=G96365](https://www.gva.es/es/inicio/procedimientos?id_proc=G96365), 2023.
- [40] Thermal insulation cavity slab 32 – datasheet. <https://www.rockwool.com/uk/products/thermal-insulation-cavity-slab-32/>, 2023.
- [41] Consumo medio de gas en una vivienda. <https://www.wolf.eu/es-es/guia/consumo-medio-de-gas>, 2024.
- [42] Cómo introducir zona climática en ce3x. <https://www.clmrehabilitacion.es/wp-content/uploads/2024/01/Como-introducir-Zona-Climatica-CE3X.pdf>, 2024.
- [43] Hempwool – technical data sheet. [https://www.hempitecture.com/wp-content/uploads/2024/11/HempWool\\_Technical-Data-Sheet.pdf](https://www.hempitecture.com/wp-content/uploads/2024/11/HempWool_Technical-Data-Sheet.pdf), 2024.
- [44] Sistema de aislamiento térmico por el exterior: definición y ventajas. <https://anfapa.com/articulos-tecnicos-sate/1375/sistema-de-aislamiento-termico-por-el-exterior-definicion-y-ventajas->, 2024.
- [45] Skyrock® glass wool – ficha técnica. [https://www.usgme.com/media/mageworx/downloads/attachment/file/u/s/usg\\_me\\_skyrock\\_glasswool\\_insulation\\_technical\\_datasheet.pdf](https://www.usgme.com/media/mageworx/downloads/attachment/file/u/s/usg_me_skyrock_glasswool_insulation_technical_datasheet.pdf), 2024.
- [46] Tarifas reguladas de gas natural. octubre 2024. [https://www.idae.es/sites/default/files/estudios\\_informes\\_y\\_estadisticas/Tarifas\\_Reguladas\\_octubre\\_2024.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/estudios_informes_y_estadisticas/Tarifas_Reguladas_octubre_2024.pdf), 2024.

- [47] Thermacork standard grade – datasheet. <https://www.thermacork.com/standard-grade>, 2024.
- [48] Ultratouch® recycled denim insulation – technical data sheet. <https://henryultratouch.com/wp-content/uploads/2024/08/Henry-UltraTouch-R13-Datasheet.pdf>, 2024.
- [49] ¿cuánto gas natural consume una vivienda? <https://www.totalenergies-ofertas.es/blog/gas/cuanto-gas-natural-consume-una-vivienda>, 2024.
- [50] Sate y descarbonización en edificación. <https://www.infoconstruccion.es/noticias/20250521/sate-descarbonizacion-edificacion>, 2025.
- [51] Using thermal imaging to assess the performance of thermal insulation of a building and develop alternatives...,. <https://sciendo.com/2/v2/download/article/10.2478/jaes-2025-0012.pdf>, 2025.
- [52] Aceroform. ¿cuáles son los beneficios de los paneles aislantes? <https://www.aceroform.com.mx/blog/cuales-son-los-beneficios-de-los-paneles-aislantes/>, 2021.
- [53] AENOR. Exigencias de aislamiento del CTE por zonas climáticas. <https://aislamientocertificado.aenor.com/exigencias-de-aislamiento-del-cte/>, 2024.
- [54] Agencia Tributaria. Deducciones por obras de mejora de eficiencia energética en viviendas. <https://sede.agenciatributaria.gob.es/Sede/vivienda-otros-inmuebles/deducciones-obras-mejora-eficiencia-energetica-viviendas.html>, 2025.
- [55] Aislamiento Térmico. Lana mineral – qué es, características y aplicaciones. <https://www.aislamientotermico.com.ar/lana-mineral>, 2024.
- [56] Hayder Al Salihi, Abdulwahid Alobaidi, Saad Al-Jibouri, and Qusay Jasim. Techno-economic analysis of heating systems in buildings using air-source and ground-source heat pumps in europe. *Energy and Buildings*, 296:113558, 2025.
- [57] MDPI Algorithms. Boiler efficiency optimization using condensing technologies. <https://www.mdpi.com/1999-4893/18/7/416>, 2024.

- [58] ANAPE and ANDIMAT. Guía técnica para la rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios con eps. Technical report, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Madrid, España, 2021.
- [59] Antihumedades. Aislante reflexivo multicapa (10 × 1,20 m): Aislamiento térmico y acústico con estructura multilámina. <https://antihumedades.es/aislante-reflexivo-multicapa-10x120m-aislamiento-termico-y-acustico-con-es.html>, n.d.
- [60] Joaquim Arcas-Abella, Anna Pagès-Ramon, Andrea Romero Gutiérrez, and Ander Bilbao Figuro. Aproximación a la demanda energética residencial para calefacción en España. Technical report, Ministerio de Fomento, Subdirección General de Políticas Urbanas, 12 2018.
- [61] ATI Asesores. Fachadas ventiladas. <http://atiasesores.com/empresas/fachadas-ventiladas/>, n.d.
- [62] BAXI Climatización, S.L.U. Normativa erp y etiquetado energético en calefacción. <https://www.baxi.es/blog/normativa-erp-y-etiquetado-energetico-en-calefaccion>, 2015.
- [63] T. Benakopoulos, M. Tunzi, R. Salenbien, and K. K. Hansen. Implementation of a strategy for low-temperature operation of radiator systems using data from existing digital heat cost allocators. *Energy*, 2022.
- [64] Hubert Blervaque, Pascal Stabat, Sila Filffi, Mathieu Schumann, and Dominique Marchio. Variable-speed air-to-air heat pump modelling approaches for building energy simulation and comparison with experimental data. *Journal of Building Performance Simulation*, 9(2): 210–225, 2015.
- [65] Boletín Oficial del Estado. Apéndice II. Coeficiente de severidad climática G. <https://www.boe.es/boe/dias/2023/07/22/pdfs/BOE-A-2023-16940.pdf>, 2023.
- [66] M. Bottarelli, E. Di Sipio, F. Bozzoli, S. Rainieri, R. Giordano, and C. Fabbri. Energy efficiency in shallow geothermal systems: A case study of vertical ground heat exchangers. [https://www.issmge.org/uploads/publications/84/130/FV\\_410\\_-\\_MT\\_5\\_-\\_FV.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/84/130/FV_410_-_MT_5_-_FV.pdf), 2020.
- [67] Calculat.org. Gas consumption – conversion of m<sup>3</sup>, kwh, mwh, ft<sup>3</sup>, btu. <https://www.calculat.org/en/energy-fuel/gas-consumption/>, 2025.
- [68] Francesco Calise, Massimo d’Accadia, Mauro Vicidomini, and Laura Vanoli. Design and simulation of a novel high temperature heat pump-based hvac system for building applications. *Energy and Buildings*, 244:111386, 2021.

- [69] CaloryFrio.com. Precio del pellet en españa – primer trimestre 2025. <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/biomasa/precios-especiales-en-sacos-de-pellets.html>, 2025.
- [70] Javier Rodríguez Carnicero. Sistemas de climatización. Documento interno del TFM, 2025.
- [71] L. Casamassima and L. Kranzl. Heating electrification and building renovation strategies to achieve the eu climate targets. *Energy and Buildings*, 2024.
- [72] Cecotec. Ready warm 6700 crystal connection – convector de cristal 1500 w. <https://www.robocleaners.com/en/cecotec-ready-warm-6700-crystal-connection-1500w-w.html>, 2025.
- [73] Certicalia. Normativa para la certificación energética: principales claves. <https://www.certicalia.com/blog/normativa-para-la-certificacion-energetica>, 2021.
- [74] Certicalia. Mapa de zonas climáticas en España. <https://www.certicalia.com/blog/mapa-zonas-climaticas-espana>, 2023.
- [75] Certicalia. ¿Cómo certificar edificios nuevos con CE3X? <https://www.certicalia.com/blog/certificar-edificios-nuevos-ce3x>, 2023.
- [76] Certificados Energéticos. ¿Y tú, de qué eres, CERMA o HULC? <https://www.certificadosenergeticos.com/y-tu-de-que-eres-cerma-o-hulc>, 2020.
- [77] Certificados Energéticos. Contenido mínimo del certificado energético. <https://www.certificadosenergeticos.com/contenido-minimo-del-certificado-energetico>, 2024.
- [78] Te-Kuang Chiang and Reinhard Radermacher. Energy savings through variable speed compressor heat pump systems. [https://www.researchgate.net/publication/271882730\\_Energy\\_Savings\\_through\\_Variable\\_Speed\\_Compressor\\_Heat\\_Pump\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/271882730_Energy_Savings_through_Variable_Speed_Compressor_Heat_Pump_Systems), 2015.
- [79] Cinco Días. A favor de una cultura de la rehabilitación sostenible. <https://cincodias.elpais.com/opinion/2025-03-27/a-favor-de-una-cultura-de-la-rehabilitacion-sostenible.html>, 2025.

- [80] CLASP. A critical review of heating technologies in europe. <https://www.clasp.ngo/research/all/a-critical-review-of-heating-technologies-in-europe/>, 2023.
- [81] ClickGasoil.com. Precio medio del gasóleo de calefacción en españa – 12 julio 2025. <https://www.clickgasoil.com/c/precio-gasoil-calefaccion,2025>.
- [82] ClimaCalefaccion.com. Caldera baxi platinum compact 24/24 f eco. <https://www.climacalefaccion.com/calderas-de-condensacion/1345-caldera-baxi-platinum-compact-2424-f-eco.html>, 2025.
- [83] Climamar. ¿cuánto cuesta instalar geotermia en una vivienda? <https://climamar.cat/instalacion-geotermia-precio>, 2025.
- [84] Comisión Europea. Propuesta de Directiva COM(2021) 802 final – Revisión de la Directiva sobre eficiencia energética de los edificios (EPBD). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52021PC0802>, 2021.
- [85] Comisión Europea. Comunicación de la Comisión COM(2022) 230 final – Plan REPowerEU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230>, 2022.
- [86] Comisión Europea. REPowerEU – Energía asequible, segura y sostenible para Europa. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_en,2022](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en,2022).
- [87] Consejo Superior de Arquitectos. Documento Básico HE 0 – Limitación del consumo energético (2022). <https://assets.aldes.es/assets/documentos/cte-db-he-0-limitacion-del-consumo-energetico.pdf>, 2022.
- [88] Construnario. Aislamiento bajo cubierta inclinada de tejas amorteradas, ursa xps. [https://www.construnario.com/aislamiento-bajo-cubierta-inclinada-de-tejas-amorteradas-ursa-xps-de-ursa-ursa-iberica-aislantes-sa\\_P2108416-URS,n.d](https://www.construnario.com/aislamiento-bajo-cubierta-inclinada-de-tejas-amorteradas-ursa-xps-de-ursa-ursa-iberica-aislantes-sa_P2108416-URS,n.d).
- [89] Coste Energía. Histórico anual de precios pvpc (precio voluntario al pequeño consumidor). <https://www.costeenergia.es/historico/pvpc-anual>, 2025.

- [90] CYPE. Estudio económico de la rehabilitación energética de un bloque de 8 viviendas. PDF, 2013.
- [91] CYPE Ingenieros. CYPETHERM HE Plus. <https://info.cype.com/es/software/cypetherm-he-plus/>, 2024.
- [92] Arnaud David, Etienne Wurtz, and Jean-Jacques Roux. Minimization of heat pump energy consumption using a ground heat exchanger with a vertical ground heat exchanger. *Energy and Buildings*, Volume 41, Issue 12, Pages 1311–1316, 2009.
- [93] Pilar de Arriba Segurado. Energy efficiency trends and policies in Spain (2000–2022). National report, ODYSSEE-MURE / IDAE. Project: ODYSSEE-MURE – Monitoring the Energy Efficiency Pillar for Climate Neutrality (LIFE21-CET-POLICY, Grant No. 101075902).
- [94] Claudio Del Pero, Silvia Buffa, Massimiliano Manfren, and Roberto Fedrizzi. Energy and environmental performance of heating systems for buildings in alpine regions. *Energy and Buildings*, Volume 166, Pages 64–76, 2018.
- [95] De’Longhi. Trrs 1225c radias – radiador de aceite. <https://www.delonghi.com/en/trrs1225c-radia-s-oil-filled-radiator/p/TRRS1225C>, 2025.
- [96] Diseyco. Aislamientos ecológicos en Sevilla al mejor precio. <https://www.diseyco.es/productos/aislamiento/precio-de-aislamientos-ecologicos-en-sevilla/>, n.d.
- [97] Domusa Teknik. Evolution ev hfm / hfc – caldera de gasóleo condensación. <https://www.domusateknik.com/en/evolution-ev-hfm-hfc>, 2025.
- [98] E. Dudkiewicz and P. Szałański. Numerical and experimental investigation of a radiator with controllable inflow. *Energy Reports*, 2020.
- [99] Duroc. Hv101 – radiador de mica 2500 w. <https://www.duroc.com/products/duroc-hv101-mica-panel-heater>, 2025.
- [100] M. Dzierzgowski. Verification and improving the heat transfer model in radiators in the wide change operating parameters. *Energies*, 2021.
- [101] Cinco Días. La calefacción que más usamos y la que más contamina: así puedes cambiarla. <https://cincodias.elpais.com/companias/2024-10-01/un-60-de-las-calderas-en-espana-tienen-mas-de-15-anos-es-mejor-cambiarla-o-arreglarla.html>, 2023.

- [102] E-ficiencia. AGREMIA propone nuevas bonificaciones en el IBI e ICIO por instalaciones de aerotermia. <https://e-ficiencia.com/agremia-nuevas-bonificaciones-ibi-ico-aerotermia>, 2025.
- [103] Ecoclimagroup. Caldera de gasoil domusa jaka hfs-30. <https://www.ecoclimagroup.com/calderas/calderas-de-gasoleo/calderas-gasoil-domusa/4464-caldera-de-gasoil-domusa-jaka-hfs-30-8435134838779.html>, 2025.
- [104] Ecogreenhome. Cómo aislar un techo con aislamiento proyectado. <https://ecogreenhome.es/aislar-techo-aislamiento-proyectado/>, 2015.
- [105] Efinovatic. SG SAVE – EnergyPlus + SketchUp para certificado energético. <https://www.efinovatic.es/energyPlus/>, 2024.
- [106] Endesa. Tipos de calderas y su evolución a lo largo de la historia. Blog de Endesa, January 2025.
- [107] Energanova. ¿cuál es el precio de una instalación con bomba de calor geotérmica? <https://energanova.es/precio-de-una-instalacion-con-bomba-de-calor-geotermica/#:~:text=Los%20costes%20de%20este%20tipo,por%20m2%20de%20captaci%C3%B3n%20horizontal>, 2025.
- [108] Certificados Energéticos. Descubre la eficiencia de las calderas de condensación. <https://www.certificadosenergeticos.com/eficiencia-calderas-condensacion>, 2025.
- [109] Energía y Habitabilidad 3.0. Material innovador – aislante térmico, jeans reciclado. <https://energiayhabitabilidad2014.wordpress.com/2014/05/15/material-innovador-aislante-termico-jeans-reciclado/>, 2014.
- [110] S. I. Evangeline and S. Darwin. The role of carbon dioxide in enhancing geothermal energy: A review of current developments and future potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025.
- [111] expertClima.es. Caldera saunier duval thema condens 25. <https://expertclima.es/caldera-saunier-duval-thema-condens-f-25.html>, 2025.
- [112] Alberto Fernández, Daniel Rodríguez, Pedro Salgado, María Jesús Escudero, and Enrique Romero. Comparative study of energy consumption and emissions in different heating systems based on heat pumps in residential buildings. *Sustainability*, 15(6):4973, 2023.

- [113] Ferroli. Atlas 25 si unit – caldera de gasóleo con acs instantánea. [https://www.ferroli.com/es/products/calderas\\_res/atlas-25-si-unit](https://www.ferroli.com/es/products/calderas_res/atlas-25-si-unit), 2025.
- [114] Ferroli. Silent eco 30 si unit low nox – caldera de gasóleo. <https://www.ferroli.com/es/products/calderas-residencial/caldera-gasoil-silent-eco-30-si-unit-low-nox>, 2025.
- [115] Flexpro Industry. Evi air a bomba de calor de agua 57kw – compresor de doble etapa. [https://www.flexpro-industry.com/e-commerce/es/evi-compressor-heat-pump/196-evi-air-a-bomba-de-calor-de-agua-57kw.html?srsltid=AfmB0orYCrL2\\_UhNcivvm9xzmSkVFZJRqpzZa\\_ZK-MqkIA81fXXHMqw](https://www.flexpro-industry.com/e-commerce/es/evi-compressor-heat-pump/196-evi-air-a-bomba-de-calor-de-agua-57kw.html?srsltid=AfmB0orYCrL2_UhNcivvm9xzmSkVFZJRqpzZa_ZK-MqkIA81fXXHMqw), 2025.
- [116] Gasfriocalor. Aerotermia vaillant arotherm vwl 45/5 con equipo autónomo vwz meh 61 monofásica sensocomfort. <https://www.gasfriocalor.com/aerotermia-vaillant-arotherm-vwl-455-con-equipo-autonomo-vwz-meh-61-monofasica-s>, 2025.
- [117] Gasogenio. ¿cuál es el poder calorífico del gasoil de calefacción? <https://gasogenio.com/es/blog/cual-es-el-poder-calorifico-del-gasoil>, 2024.
- [118] Gebwell Oy. What does ground source heating cost? <https://gebwell.fi/en/ground-source-heat/what-ground-source-heating-costs>, 2025.
- [119] Gobierno de España. Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-3904>, 2013.
- [120] Gobierno de España. Código Técnico de la Edificación - Documento Básico de Ahorro de Energía. [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-18528](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-18528), 2019.
- [121] Gobierno de España. Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-9176>, 2021.
- [122] Jin He, Chuang Fu, Yonggang Ma, and Bin Zhao. Energy performance and environmental assessment of air source heat pump systems under different climate conditions in china. *Sustainability*, 14(21), 14298, 2022.

- [123] Arif Hepbasli and Yasin Kalinci. A review of heat pump water heating systems. *Energy and Buildings*, Volume 70, Pages 259–270, 2014.
- [124] HidalGas.es. Opinión caldera vaillant ecotec plus 246/5-5. <https://www.hidalgas.es/blog/opinion-caldera-vaillant-ecoTEC-plus-246>, 2025.
- [125] Home Doctors, LLC. Multi-layer reflective insulation for radiant heat control. <https://homedoctorsonline.com/multi-layer-reflective-insulation/>, 2021.
- [126] Segun E. Ibitoye, Rasheedat M. Mahamood, Tien-Chien Jen, Chanchal Loha, and Esther T. Akinlabi. An overview of biomass solid fuels: Biomass sources, processing methods, and morphological and microstructural properties. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(4):333–360, 2023.
- [127] IDAE. Evaluación del potencial de uso de la cogeneración de alta eficiencia y de los sistemas urbanos de calefacción y refrigeración eficientes. <https://www.idae.es/technologies/energy-efficiency/conversion-energy/evaluation-potential-high-efficiency-cogeneration>, 2020.
- [128] IDAE. RD 477/2021 – Ayudas a la climatización renovable en el sector residencial. <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-energias-renovables-en-autoconsumo-almacenamiento-y-termicas-sector/rd-4772021-ayudas-la-climatizacion-en-sector-residencial>, 2021.
- [129] IDAE. Beneficios fiscales en el IRPF para la implantación de energías renovables térmicas. <https://www.idae.es/noticias/beneficios-fiscales-en-el-irpf-para-la-implantacion-de-energias-renovables> 2023.
- [130] IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Estrategias de mejora de la eficiencia energética en edificios. [https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/ayudas\\_y\\_financiacion/GUIA\\_PRACTICA\\_PARA\\_LA\\_GESTION\\_DE\\_AYUDAS\\_A\\_LA\\_REHABILITACION\\_ENERGETICA\\_EDIFICIOS\\_2021.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/ayudas_y_financiacion/GUIA_PRACTICA_PARA_LA_GESTION_DE_AYUDAS_A_LA_REHABILITACION_ENERGETICA_EDIFICIOS_2021.pdf), 2020.
- [131] Impertechos. Materiales aislantes en mexicali. <https://impertechos.com/blog/materiales-aislantes-en-mexicali/>, 2023.
- [132] InfoConstrucción. Sate: Sistema constructivo en constante crecimiento. <https://www.infoconstruccion.es/articulos/20210524/anfapa-sate-crece>, 2021.

- [133] Institut Català d’Energia (ICAEN). FAQs sobre el CEE (versión 2020). [https://icaen.gencat.cat/web/.content/10\\_ICAEN/17\\_publicacions\\_informes/08\\_guies\\_informes\\_estudis/informes\\_i\\_estudis/arxius/20201009-Nou-FAQS\\_CEE\\_castella\\_Acc.pdf](https://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/08_guies_informes_estudis/informes_i_estudis/arxius/20201009-Nou-FAQS_CEE_castella_Acc.pdf), 2020.
- [134] Instituto Geográfico Nacional y AEMET. Atlas Nacional de España - Clima. <https://atlasnacional.ign.es/wane/Clima>, 2023.
- [135] Insulation Marketplace (EDM). Multilayer reflective thermal insulation (0.4×5 m). <https://www.latiendadeelectricidad.com/gb/diy/178084-multilayer-reflective-thermal-insulation-04x5m-8435584420111.html>, 2025.
- [136] International Energy Agency. The future of heat pumps. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>, 2022.
- [137] IPUR – Asociación de la Industria del Poliuretano Rígido. Guía de aplicación de poliuretano proyectado e inyectado. <https://aisla.org/PUR.pdf>, 2025.
- [138] Junta de Castilla y León. Recomendaciones de mejora y ROI en certificados energéticos. <https://servicios3.jcyl.es/enbo/siau/contenido/NG1kYTNsMVVjMlJZSWhBTndtQ05Jcml6Y05HakJWZWowSm5BRGhJNUpiRT0>, 2024.
- [139] Birol Kilkis. Exergy based performance evaluation of a novel heat pump system. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Paper 2320, Purdue e-Pubs, 2014.
- [140] S. Kumar and A. Sharma. Comparative analysis of radiant and radiator heating system for a residential building. [https://www.researchgate.net/publication/369054150\\_Comparative\\_analysis\\_of\\_radiant\\_and\\_radiator\\_heating\\_system\\_for\\_a\\_residential\\_building](https://www.researchgate.net/publication/369054150_Comparative_analysis_of_radiant_and_radiator_heating_system_for_a_residential_building), 2023.
- [141] Lasian. Activa 40 a – caldera de gasóleo mixta (calefacción + acs). [https://lasian.es/wp-content/uploads/2022/01/55798-08-ACTIVA-A-C-PLUS\\_Ene-2022.pdf](https://lasian.es/wp-content/uploads/2022/01/55798-08-ACTIVA-A-C-PLUS_Ene-2022.pdf), 2022.
- [142] LeroyMerlin.es. Caldera ferroli bluehelix pro rrt 28 c. <https://www.leroymerlin.es/productos/caldera-de-condensacion-gas-natural-ferroli-bluehelix-28kw-instalacion-incluida.html>, 2025.
- [143] LG España. Lg therma v monobloc – bomba de calor aire-agua. [https://www.lg.com/es/heating-awhp/monobloc/?srsltid=AfmB0ooRb0MKZ08oAL5Cw-n1c3ZlZLkXiXXzTBUVY0olewh5tbWC1\\_xK](https://www.lg.com/es/heating-awhp/monobloc/?srsltid=AfmB0ooRb0MKZ08oAL5Cw-n1c3ZlZLkXiXXzTBUVY0olewh5tbWC1_xK), 2025.

- [144] Z. Liao, L. Dong, Y. Tao, and H. Liu. Experimental study on energy consumption and thermal environment of a radiant ceiling heating system serving different room types. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221028048>, 2022.
- [145] Xiaohui Liu, Xun Shi, Guoqiang Zhang, and Lina Yang. Performance assessment and economic evaluation of residential air source heat pump system in a cold climate zone of china. *Building Simulation*, 11(4):781–793, 2018.
- [146] Z. Liu, W. Xu, Z. Li, L. Zhang, J. Li, and A. Feng. Research on heating performance of heating radiator at low temperature. *Journal of Building Engineering*, 2021.
- [147] Rubén López, David Bertermann, Nicola Kurek, Juan Vázquez, Ángel Rivas, Alessandro Casasso, and Miklos Antics. Geothermal heat pumps and the energy performance of buildings: A review including technical, economic, and environmental aspects. *Energies*, 14(12):3563, 2021.
- [148] A. Malicse. The advantages of self-sufficient countries with manageable populations and minimal import dependence, 2024.
- [149] MercaClima. Acumulador daitsu aquatank with hp 400l. <https://www.mercaclima.es/p10783708-acumulador-daitsu-aquatank-witd-hp-4001.html>, 2025.
- [150] Ministerio de Fomento. Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía (CTE). <https://www.boe.es/boe/dias/2013/09/12/pdfs/BOE-A-2013-9511.pdf>, 2013.
- [151] Ministerio de Fomento. Documento Básico HE 0 – Limitación del consumo energético (2013). [https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/infraestructuras/sistemas-gestion/sgiee/Normativa/DB\\_HE0\\_septiembre\\_2013.pdf](https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/infraestructuras/sistemas-gestion/sgiee/Normativa/DB_HE0_septiembre_2013.pdf), 2013.
- [152] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Documento HE - Código Técnico de la Edificación. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>, 2023.
- [153] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Código Técnico de la Edificación (CTE) – Documentos Básicos y normativa vigente. <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte>, 2024.
- [154] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (CTE). CTE-DB-HE1: Condiciones para el control de la demanda energética, 2019.

- [155] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (CTE). CTE-DB-HE3: Condiciones de las instalaciones de iluminación, 2019.
- [156] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (CTE). CTE-DB-HE4: Contribución mínima de energía renovable para ACS. Documento PDF oficial del CTE, 2019.
- [157] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (CTE). CTE-DB-HE5: Generación mínima de energía eléctrica procedente de fuentes renovables. Documento PDF oficial del CTE, 2019.
- [158] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. Ayudas europeas para la rehabilitación de edificios y viviendas. <https://www.mivau.gob.es/vivienda/ayudas-europeas-rehabilitacion-edificios-viviendas>, 2024.
- [159] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Calificación de la eficiencia energética de los edificios. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/Eficiencia/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/documentos-reconocidos/normativamodelosutilizacion/20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf>, 2015.
- [160] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE). <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-a-largo-plazo/>, 2020.
- [161] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023–2030. <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/plan-nacional-integrado-energia-clima/>, 2023.
- [162] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Registro General de Documentos Reconocidos para la certificación energética. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/certificacion-energetica.html>, 2023.
- [163] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Distribución climática para pobreza energética. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/ministerio/servicios/participacion-publica/archivos-base/borradorestrategianacionalpobrezaenergeticconsultapublica\\_tcm30-487575.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/ministerio/servicios/participacion-publica/archivos-base/borradorestrategianacionalpobrezaenergeticconsultapublica_tcm30-487575.pdf), 2024.

- [164] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/rite.html>, 2024.
- [165] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Estado de la certificación energética de los edificios (11.º informe, informe diciembre 2022). PDF en línea, December 2022.
- [166] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Procedimientos reconocidos para certificación energética. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/certificacion-energetica/documentos-reconocidos/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.html>, 2024.
- [167] S. Mohammadzadeh, S. Sanyal, R. Rodriguez, and D. Shearer. Performance evaluation and long-term simulation of a vertical ground source heat pump system in residential application. <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2024/Mohammadzadeh.pdf>, 2024.
- [168] Tadeusz Moskalik and Arkadiusz Gendek. Production of chips from logging residues and their quality for energy: A review of european literature. *Forests*, 10(3):262, 2019.
- [169] Georgios A. Mouzeviris and Konstantinos T. Papakostas. Comparative analysis of air-to-water and ground source heat pumps performances. *International Journal of Sustainable Energy*, 40(1): 69–84, 2021.
- [170] Move2Green Limited. Biomass wood pellets versus wood chip. <https://moodle.nptcgroup.ac.uk/mod/resource/view.php?id=129196&redirect=1>, 2015.
- [171] Jeffrey Munk, Dustin Christensen, Jason Woods, and Peter Armstrong. Field performance of cold climate air source heat pumps in the united states. U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2022.
- [172] Natural Resources Canada. Fact sheet: Reducing electric heating costs with radiant floors. [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2025/rncan-nrcan/M154-170-2024-eng.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2025/rncan-nrcan/M154-170-2024-eng.pdf), 2024.
- [173] Natural Resources Canada. Keeping the heat in - section 2: How your house works. <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/home-energy-efficiency/keeping-heat-section-2-your-house-works>, 2024.

- [174] NaturClima. Caldera: condensación o estanca – consumo y eficiencia. Sitio web NaturClima Energy, 2025.
- [175] New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA). Field monitoring of ground-source heat pumps on long island. <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Project/Nyserda/Files/Publications/Research/Other-Technical-Reports/24-04-Field-Monitoring-Ground-Source-Heat-Pumps-on-Long-Island-acc.pdf>, 2024.
- [176] NPro Energy. Heat load and demand — load profiles. <https://www.npro.energy/main/en/load-profiles/heat-load-and-demand>, 2024.
- [177] OGISA. Calderas de condensación vs. calderas convencionales. <https://ogisa.es/calderas-de-condensacion-vs-calderas-convencionales/>, 2024.
- [178] Orbegozo. Rre 1510 – emisor térmico seco programable. <https://www.amazon.com.be/-/en/RRE-1510-Energy-Saving-Programmable-Aluminium/dp/B01MG2N0TU>, 2025.
- [179] Ruairí O’Hegarty, Oliver Kinnane, and David Lennon. Air-to-water heat pumps: Performance gap between in-use and product-rated performance. Energy and Buildings, Elsevier, 2022.
- [180] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Registro de huella de carbono – factores de emisión de gas natural. <https://huellacarbono.redciudadesclima.es/sites/default/files/pdf/metodologia.pdf>, 2024.
- [181] Parlamento Europeo y Consejo. Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>, 2010.
- [182] Parlamento Europeo y Consejo. Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32018L0844>, 2018.
- [183] Parlamento Europeo y Consejo. Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática (Ley Europea del Clima). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>, 2021.

- [184] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Directiva 2009/28/ce sobre el fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0028>, 2009.
- [185] Placomat. Aislar con poliestireno: Eps y xps. <https://www.placomat.com/blog/aislar-poliestireno-eps-xps/>, 2019.
- [186] Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Conoce las ayudas europeas para la rehabilitación de viviendas (PRTR). <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/conoce-ayudas-europeas-rehabilitacion-viviendas-prtr>, 2024.
- [187] Poliuretano y Poliurea. Nosotros. <https://poliuretanoypoliurea.com/nosotros>, 2023.
- [188] Preciogas. Factor de conversión de gas natural a kwh – poder calorífico superior. <https://preciogas.com/facturas-gas/factor-conversion-gas-natural-kwh>, 2025.
- [189] Presidencia del Gobierno. Real decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación nbe-ct-79, sobre condiciones térmicas en los edificios. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1979-24866>, julio 1979.
- [190] QualRenovate. Energy Performance Certificates (EPC). <https://qualrenovate.eu/services-products/energy-performance-certificates/energy-performance-certificates>, 2024.
- [191] Raquel Lara Campos (Consejera Técnica, MITMA). Eresee 2020: Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España. Presentación (PDF) disponible en URBACT, 2020.
- [192] Francisco Rebelo, Ana Figueiredo, Rita Vicente, and Rui Almeida. Thermal performance assessment of pcm-based floor heating solutions in residential buildings. *Journal of Building Engineering*, 81:107182, 2023.
- [193] Francisco Rebelo, Ana Figueiredo, Rita Vicente, and Rui Almeida. Experimental study on the integration of phase change materials (pcm) in radiant floor heating systems. *Journal of Building Engineering*, 96:107803, 2024.
- [194] Reflectix, Inc. Double reflective insulation. <https://www.reflectixinc.com/products/double-reflective-insulation/>, 2025.

- [195] Reformas Integrales 10. ¿qué es el sistema de aislamiento exterior de fachadas sate? <https://reformasintegrales10.com/aislamiento/fachadas-sate-que-es/>, n.d.
- [196] Reto Kömmerling. La zona climática – aislamiento térmico según cte. <https://retokommerling.com/aislamiento-termico-la-zona-climatica/>, 2024.
- [197] Rhonatherm. Aislamiento térmico sate y normativa cte. <https://www.saterhonatherm.com/blog/aislamiento-termico-cte-sate/>, 2023.
- [198] Kamil Roman and Emilia Grzegorzewska. Biomass briquetting technology for sustainable energy solutions. *Energies*, 17(24):6392, 2024.
- [199] M. Rossitto and co-authors. Energy and cost assessment of radiator vs. radiant heating terminals in residential buildings. <https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/a1e825d7-7bff-46c6-b44c-8a2905909d3f-MECA.pdf>, 2024.
- [200] Rajitha Lakshan Rupasinghe, Priyan Perera, Rangika Bandara, Hiran Amasekera, and Richard Vlosky. Insights into properties of biomass energy pellets made from mixtures of woody and non-woody biomass: A meta-analysis. *Energies*, 17(1):54, 2024.
- [201] Safe Energy. Aislhogar – aislante de lana de vidrio. <https://safe-energy.cl/aislhogar-aislante-de-lana-de-vidrio/>, n.d.
- [202] Ioan Sarbu and Calin Sebarchievici. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energies*, 9(4):228, 2016.
- [203] Alberto Schlöpfer, Peder Bacher, and Christian Sager. Heat pump systems in zero emission buildings. In: Jørgensen, B.N. (eds), *Smart Buildings*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [204] servicio-junkers.com. Junkers cerapur zwbc 24-2 c – caldera de condensación. [https://servicio-junkers.com/producto.php?articulo=caldera\\_junkers\\_CERAPUR\\_ZWBC\\_24\\_2C&idproducto=543](https://servicio-junkers.com/producto.php?articulo=caldera_junkers_CERAPUR_ZWBC_24_2C&idproducto=543), 2025.
- [205] Kutbay Sezen and Afsin Gungor. Performance analysis of air source heat pump according to outside temperature and relative humidity with mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 263:115702, 2022.
- [206] Bo Shen, Omar Abdelaziz, and C. Keith Rice. Assessment of performance potential of ashp systems for residential space heating in china. *Energy Procedia*, 104: 320–325, 2016.

- [207] Slow Studio. Aislamientos naturales. <https://www.slowstudio.es/research/aislamientos-naturales>, 2023.
- [208] The Eco Experts. Bombas de calor: precio y cuánto puedes ahorrar. <https://www.theecoexperts.com/es/aerothermia/bombas-de-calor-precio>, 2025.
- [209] Thermofloc España y Portugal. Aislamiento insuflado con celulosa. <https://www.thermofloc.es/aislamiento-con-celulosa/aislamiento-insuflado/>, n.d.
- [210] Tornasol Energy. Nueva normativa de eficiencia energética en viviendas para 2030 y 2033 en España. <https://www.tornasol.energy/blogs/news/nueva-normativa-de-eficiencia-energetica-en-viviendas-para-2030-y-2033-en-2024>.
- [211] TuCalentadorEconómico. Acumulador acs suicalsa dab-v 400 litros. <https://tucalentadoreconomico.es/acumuladores-ac-calefaccion/4397-acumulador-ac-suicalsa-dab-v-400-litros.html>, 2025.
- [212] Universitat Politècnica de Catalunya. Clasificación climática española según el CTE. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/397497/12087\\_9999?sequence=2](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/397497/12087_9999?sequence=2), 2023.
- [213] Vaillant. Ficha técnica oficial arotherm vwl 45/5 monofásica. <https://www.vaillant.es/product-images/0020297938-08.pdf>, 2024.
- [214] Zhichao Wang, Ping Wu, and Qiang Yang. Energy-saving analysis of air source heat pump integrated with a water storage tank for heating applications. ResearchGate, 2020.
- [215] B. Weigel, D. Secrest, and co-authors. Technical evaluation of air-to-water heat pumps with thermal storage. Final Report ET22SWE0050, CALNEXT / Southern California Edison, 2024.
- [216] Wikimedia Commons. Categoría: Heat transfer. [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Heat\\_transfer](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Heat_transfer), 2025.
- [217] Wikipedia. Poliuretano proyectado. [https://es.wikipedia.org/wiki/Poliuretano\\_proyectado](https://es.wikipedia.org/wiki/Poliuretano_proyectado), 2025.
- [218] Wikipedia contributors. Pellet fuel. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pellet\\_fuel](https://en.wikipedia.org/wiki/Pellet_fuel), 2025.

- [219] Chunling Wu, Fang Liu, Xiaofeng Li, Zhichao Wang, Zhaowei Xu, Wenyuan Zhao, Yingxia Yang, Pin Wu, Ce Xu, and Yichao Wang. Low-temperature air source heat pump system for heating in severely cold area: Long-term applicability evaluation. *Building and Environment*, 208:108594, 2022.
- [220] Pin Wu, Zhichao Wang, Fang Liu, Xiaofeng Li, Zhaowei Xu, Wenyuan Zhao, Yingxia Yang, Ce Xu, and Yichao Wang. Experimental investigation on the heating performance of a low ambient temperature air source heat pump with vapor-injection compressor in cold climate. *Applied Thermal Engineering*, Volume 226, 120302, 2023.
- [221] Xiaomi. Mi smart space heater s – convector eléctrico 2200 w. <https://www.mi.com/es/product/mi-smart-space-heater-s/>, 2025.
- [222] YellowBlue Eco Tech. Multi-layer reflective insulation blanket. <https://yellowbluetech.com/products-technologies/multi-layer-insulation/>, 2025.
- [223] Cagdas Yildiz and Ozgur Demirtas. A review on heat pump systems: Applications and performance assessment. *International Journal of Engineering Science and Application (IJES)*, Vol. 6, No. 2, 2022.
- [224] A. Zarrella, A. Di Bella, et al. Improvement of thermal comfort and energy performance in buildings through model predictive control. *Applied Sciences*, 2018.
- [225] X. J. Zheng, D. Liu, and T. Wang. Performance of the air source heat pump assisted solar heating system combined with pcm floor. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431123021440>, 2024.
- [226] Grażyna Łaska and Ayodeji R. Ige. A review: Assessment of domestic solid fuel sources in nigeria. *Energies*, 16(12):4722, 2023.

