



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Análisis y comparativa energética del
forjado aligerado frente a otras soluciones
constructivas tradicionales**

Autor:

Muriel Martín, Arturo

Tutor:

**Herráez Sánchez, Marta
CMeIM/Ingeniería Mecánica**

Valladolid, abril de 2023

RESUMEN

En los últimos años, el ahorro y la eficiencia energéticos se han convertido en uno de los aspectos más relevantes a tratar, y a la vez uno de los retos más difíciles de conseguir en el objetivo global de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en los distintos sectores económicos y sociales. Entre los sectores más importantes, se encuentra el sector de la construcción, en el cual se está generando un gran énfasis en la búsqueda de materiales con altas propiedades de aislamiento térmico y, a su vez, sostenibles y ambientalmente inofensivos. Uno de los materiales destacables para cumplir estos propósitos es el poliestireno expandido (EPS). Así pues, en este Trabajo de Fin de Grado se realizará un estudio del comportamiento energético del mismo en los forjados de un edificio, así como una comparación energética con las principales soluciones constructivas tradicionales, el forjado de hormigón y el forjado cerámico, para comprobar como contribuye al ahorro y eficiencia energéticos.

Palabras clave: eficiencia energética, EPS, forjado, consumo energético, emisiones de CO₂.

ABSTRACT

In recent years, energy savings and efficiency have become one of the most relevant aspects to deal with, and at the same time one of the most difficult challenges in the overall objective of reducing greenhouse gas emissions in the various economic and social sectors. Among the most important sectors, the construction industry stands out, in which a great emphasis is being put in the search for materials with high thermal insulation as well as sustainable and environmentally harmless properties. One of the remarkable materials to fulfil these purposes is the expanded polystyrene (EPS). Thus, in this dissertation a study of the energy behaviour of this material in a building's slabs will be made, as well as an energy comparison with the main traditional constructive solutions, concrete slab and ceramic slab, to see how it contributes to energy savings and efficiency.

Keywords: energy efficiency, EPS, slab, power consumption, CO₂ emissions.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mi hermana, María y mis hermanos, que son mi referencia desde pequeño y las personas que más me han apoyado siempre en todos los pasos que he dado.

A mi familia y a mis abuelos, aunque por desgracia no todos hayan podido verme terminar, siempre se han preocupado por mi y por mi trabajo.

A Ana, que ha estado ahí en todo momento, sacándome una sonrisa en mis peores momentos, y ha sido uno de mis pilares fundamentales durante todo este año, le debo mucho.

A la empresa FOREL, por permitirme aprender con ellos y darme la oportunidad de realizar este Trabajo de Fin de Grado, así como de realizar mi primer acercamiento al mundo laboral. En especial quería dar gracias a Esteban, que ha sido tanto quien me proporcionó la idea como quien me ha guiado durante toda mi etapa de prácticas, así como a Santi, que ha sido un gran compañero durante mi estancia en FOREL.

A mi tutora, la Dra. Marta Herráez, que ha sido mi guía durante la realización de este trabajo, y sin la que no habría podido realizarlo, sacando lo mejor de mí y aconsejándome a lo largo de todo el proceso.

Al profesor Eloy Velasco, que se ha preocupado por mi progreso y me ha proporcionado en todo momento la ayuda que le he solicitado.

A mis amigos, que siempre son una vía de escape en los momentos complicados.

Índice de contenido

1. Introducción y objetivos.	19
1.1. Ámbito energético: Marco global y europeo.	22
1.1.1. El Protocolo de Kyoto.	22
1.1.2. Europa y el sector residencial.	23
1.2. Marco normativo en España.	29
1.2.1. Documento Básico HE de ahorro de energía.	29
1.2.2. Documento Básico HS de salubridad.	30
1.2.3. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.	30
1.3. Objetivos.	31
1.4. Presentación documento.	32
2. Conceptos básicos utilizados y presentación del material principal del estudio.	35
2.1. Conceptos básicos.	35
2.1.1. Forjado reticular.	35
2.1.2. Energía primaria.	36
2.1.3. Demanda energética.	36
2.1.4. Emisiones de CO ₂ .	36
2.1.5. Equipo de calefacción.	36
2.1.6. Equipo de refrigeración.	36
2.1.7. Equipo de Agua Caliente Sanitaria ACS.	36
2.1.8. Equipo de ventilación.	37
2.1.9. Zona climática.	37
2.1.10. Envolvente térmica.	37
2.1.11. Puente térmico.	37
2.12. Relación entre energía primaria consumida y emisiones de CO₂.	37
2.13. Bomba de calor.	37
2.2. Poliestireno expandido (EPS).	37
2.2.1. Método de conformado.	39
2.3.2. Conductividad térmica.	40
2.2.3. Aplicaciones del EPS.	42

3. Modelo de estimación del comportamiento energético del edificio.	47
3.1. Herramienta de cálculo: Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).	47
3.1.1. Programas LIDER y CALENER.	47
3.1.2. Etapas desarrolladas por la herramienta HULC.	48
3.2. Casos de estudio.	52
3.3. Elementos constructivos y forjados.	54
3.3.1. Elementos constructivos del caso A (edificio simplificado).	54
3.3.2. Elementos constructivos del caso B (edificio real).	57
3.3.3. Forjados, cubiertas y placa de EPS.	60
3.4. Equipos de climatización.	63
3.4.1. Equipos de climatización del caso A (edificio simplificado).	63
3.4.2. Equipos de climatización del caso B (edificio real).	66
4. Presentación e interpretación de Resultados del comportamiento energético del edificio.	69
4.1. Forjados sin placa.	70
4.1.1. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO ₂ totales.	70
4.1.2. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO ₂ en calefacción.	75
4.1.3. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO ₂ en refrigeración.	82
4.1.4. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO ₂ para ACS y ventilación.	89
4.2. Forjados con placa.	96
4.2.1. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO ₂ totales.	96
4.2.2. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO ₂ en calefacción.	100
4.2.3. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO ₂ en refrigeración.	104
4.3. Calificación energética.	108
5. Estudio económico del Trabajo de Fin de Grado.	115
5.1. Etapas del Trabajo de Fin de Grado.	115
5.2. Costes del Trabajo de Fin de Grado.	116

6. Conclusiones y líneas de futuro.	119
7. Bibliografía.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Objetivos de la agenda 2030 [femcet].	19
Figura 2. Categorías de calificación energética de edificios [IDAE-b].....	21
Figura 3. Energía final consumida por sector en la Unión Europea [Odyssee-a].	24
Figura 4. Evolución de la “Energy Performance in Buildings Directive” (EPBD) desde su creación en el año 2002 hasta su última actualización en el año 2018 [Olasolo].	25
Figura 5. Esquema en el que se refleja la normativa relacionada con la mejora energética desde la escala mundial hasta el nivel nacional dentro de la Unión Europea.	27
Figura 6. Variación de la energía residencial consumida entre 2014 y 2019 en la Unión Europea [Rousselot].	28
Figura 7. Esquema resumen de la estructura del Trabajo de Fin de Grado. ..	33
Figura 8. Esquema de un forjado reticular [Forel].	35
Figura 9. Preexpansor en fábrica [Turq.].	39
Figura 10. Esquema del proceso de fabricación de piezas de EPS.....	40
Figura 11. Sistema de aislamiento térmico por el exterior (SATE) [IDAE].	43
Figura 12. Sistema de aislamiento térmico por el interior [IDAE].....	44
Figura 13. Procedimiento de aislamiento de cubierta inclinada [BASF].	45
Figura 14. Parámetros generales a introducir en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).	49
Figura 15. Cerramiento correspondiente a un muro generado a partir de la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).	50
Figura 16. Ejemplo del cumplimiento de las exigencias del apartado HE1 en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).	50
Figura 17. Ejemplo de definición de equipos de climatización en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).....	51
Figura 18. Ejemplo de verificación de la sección HE0 en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).....	51
Figura 19. Ejemplo de calificación energética de un edificio obtenida mediante la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).	52
Figura 20. Edificio correspondiente al caso A, modelado mediante la herramienta HULC.	53
Figura 21. Edificio correspondiente al caso B, modelado mediante la herramienta HULC.	54
Figura 22. Vista de los cerramientos correspondientes a los muros exteriores, en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).....	55
Figura 23. Vista de los cerramientos correspondientes a las particiones interiores, en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).....	56

Figura 24. Vista de los cerramientos correspondientes a ventanas, en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).....	56
Figura 25. Vista de los cerramientos correspondientes a los muros exteriores, en color rojo, para el caso B (edificio real).	58
Figura 26. Vista de los cerramientos correspondientes a los lucernarios, en color rojo, del caso B (edificio real).	59
Figura 27. Vista de los cerramientos correspondientes a las ventanas, en color rojo, del caso B (caso real).....	59
Figura 28. Vista de los cerramientos correspondientes a la solera (arriba izquierda), forjado intermedio (arriba derecha) y cubierta (abajo), en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).....	62
Figura 29. Vista de los cerramientos correspondientes al forjado de la cámara sanitaria (arriba izquierda), forjado interior (arriba derecha) y cubierta inclinada (abajo), en color rojo, para el caso B (edificio real).....	63
Figura 30. Vista de los espacios donde se sitúan las unidades terminales de calefacción, para la vista tridimensional (arriba) y en planta (abajo) del caso A (edificio simplificado).	64
Figura 31. Propiedades del conjunto de ventiladores que forman el sistema de ventilación para el caso A (edificio simplificado).	65
Figura 32. Propiedades del sistema de ventilación para el caso B (edificio real).	67
Figura 33. Valores totales de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).	71
Figura 34. Valores totales de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio completo).	73
Figura 35. Contribución del equipo de calefacción sobre el total para los principales parámetros relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).	77
Figura 36. Valores del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).	78
Figura 37. Contribución del equipo de calefacción sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).....	80
Figura 38. Valores del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).....	81
Figura 39. Contribución del equipo de refrigeración sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).	84

Figura 40. Valores del equipo de refrigeración para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).	85
Figura 41. Contribución del equipo de refrigeración sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).....	87
Figura 42. Valores del equipo de refrigeración para los principales parámetros relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).....	88
Figura 43. Contribución del equipo de ACS sobre el total para los principales parámetros relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).	91
Figura 44. Contribución del equipo de ventilación sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).	92
Figura 45. Contribución del equipo de ACS sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).	94
Figura 46. Contribución del equipo de ventilación sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).....	95
Figura 47. Valores totales de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).....	98
Figura 48. Valores comparativos entre los forjados con y sin placa para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).	99
Figura 49. Valores del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).	102
Figura 50. Valores comparativos entre los forjados con y sin placa de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para el equipo de calefacción (caso A, edificio simplificado).....	103
Figura 51. Valores comparativos entre los forjados con y sin placa de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para el equipo de refrigeración (caso A, edificio simplificado)	106
Figura 52. Valores del equipo de refrigeración para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).	107
Figura 53. Calificación energética en base a las emisiones de CO ₂ totales de los forjados sin placa para el caso A (edificio simplificado). Las calificaciones se corresponden, de arriba hacia abajo, al forjado de hormigón, cerámico y EPS.	109

Figura 54. Calificación energética en base a las emisiones de CO₂ totales de los forjados con placa para el caso A (edificio simplificado). Las calificaciones se corresponden, de arriba hacia abajo, al forjado de hormigón, cerámico y EPS. 110

Figura 55. Calificación energética en base a las emisiones de CO₂ totales de los forjados para el caso B (edificio real). Las calificaciones se corresponden, de arriba hacia abajo, al forjado de hormigón, cerámico y EPS..... 112

Figura 56. Diagrama de Gantt del desarrollo del Trabajo de Fin de Grado. . 116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contribución de los diferentes gases de efecto invernadero considerados por el Protocolo de Kyoto [Galante].....	23
Tabla 2. Valores habituales de la conductividad térmica del EPS en función de su densidad [IDAE].	42
Tabla 3. Principales características de los tres forjados de estudio del Trabajo de Fin de Grado.	60
Tabla 4. Valores absolutos y comparativos de los resultados totales correspondientes a los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).....	71
Tabla 5. Valores absolutos y comparativos de los resultados totales correspondientes a los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).	73
Tabla 6. Valores absolutos y comparativos para el equipo de calefacción de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).	76
Tabla 7. Valores absolutos y comparativos para el equipo de calefacción de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).....	79
Tabla 8. Valores absolutos y comparativos para el equipo de refrigeración de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A).....	83
Tabla 9. Valores absolutos y comparativos para el equipo de refrigeración (caso B, edificio real).	86
Tabla 10. Valores absolutos y contribución sobre el total de los equipos de generación de ACS y ventilación para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).....	90
Tabla 11. Valores absolutos de los equipos de ACS y ventilación y contribución de cada uno de ellos sobre el total (caso B, edificio real).	93
Tabla 12. Valores absolutos y comparativos de los resultados totales para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).	97
Tabla 13. Valores absolutos y comparativos del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).	101
Tabla 14. Valores absolutos y comparativos del equipo de refrigeración para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).	105

Tabla 15. Cálculo de horas efectivas en la realización del Trabajo de Fin de Grado.....	116
Tabla 16. Coste de la mano de obra empleada en la realización del Trabajo de Fin de Grado, en €.....	117
Tabla 17. Costes totales del Trabajo de Fin de Grado, en €.....	117

LISTA DE SIGLAS

ACS – Agua Caliente Sanitaria.

AICIA – Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía.

CALENER – Calificación Energética de Edificios.

CERMA – Calificación Energética Residencial Método Abreviado.

CH₄ – Metano.

CO₂ – Dióxido de carbono.

CTE – Código Técnico de la Edificación.

DBHE – Documento Básico HE de ahorro de energía.

DBHS – Documento Básico HS de salubridad.

DE – Demanda Energética.

DOCET – Diagnosi e Certificazione Energetica degli Edifici Residenciali Esistenti.

EF – Energía Final.

EP – Energía Primaria.

EPBD – Energy Performance in Buildings Directive.

EPS – Poliestireno expandido.

FC – Forjado Cerámico.

FEPS – Forjado de EPS.

FH – Forjado de Hormigón.

F_{pr,el} – Factor de producción eléctrica.

g – Factor solar.

GEI – Gases de Efecto Invernadero.

HCF – Hidrofluorocarbonos.

HULC – Herramienta Unificada Lider Calener.

IETCC – Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción.

k – Conductividad térmica.

K – Kelvin.

kg – Kilogramo.

LIDER – Limitación de la Demanda Energética.

m – Metro.

Mtoe – Megatoneladas equivalentes de petróleo.

N₂O – Óxido nitroso.

NZEB – Nearly Zero-Energy Building.

PFC – Perfluorocarbonos.

PMRI – Potencia Mínima Renovable Instalada.

PT_f – Pérdidas de Transformación.

PT_p – Pérdidas por Transporte.

PVC – Cloruro de polivinilo.

q – Flujo de calor transmitido.

RITE – Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

RT – Réglementation Thermique.

SAP – Standard Assessment Procedure.

SATE – Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior.

SCE – Sistema de Certificación Energética de Edificios.

SF₆ – Hexafluoruro de azufre.

T – Temperatura.

UE – Unión Europea.

W – Vatio.

XPS – Poliestireno extruido.

1. Introducción y objetivos.

El término eficiencia energética es más complejo de lo que parece, y hay una falta de claridad sobre el alcance del mismo, teniendo un significado distinto en distintos contextos. Aunque es evidente que aún los conceptos de eficiencia y energía, se extiende no solo a los consumos de energía, sino a los procesos de producción, a las empresas, instituciones, sectores económicos, territorios o economías [Fernández]. En esencia, la eficiencia energética implica la utilización de la energía de la manera más eficiente para ejecutar un proceso productivo o proveer un servicio, minimizando las pérdidas de energía y el consumo de energía y otras materias primas. De hecho, el término eficiencia energética puede incorporar otros conceptos distintos del uso eficiente de la energía, tales como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero o la mejora en la seguridad de suministro de energía.

El 25 de septiembre de 2015, 193 países alcanzaron un acuerdo internacional denominado “Agenda 2030”. El objetivo del acuerdo implica básicamente la erradicación de la pobreza y la protección del planeta. Dicha agenda se articula en torno a 17 objetivos estructurados en 169 metas [mdsocialesa2030-a]. Dada la ambición de los objetivos, para su cumplimiento se establece un plazo quince años, ya que implica no solo a los gobiernos, sino también a la sociedad, que deberían acometer transiciones profundas y complicadas. A mayores de la complejidad del reto, a los cinco años de firmarse el acuerdo, irrumpe en el mundo la pandemia de la COVID-19, frenando el avance de la agenda y poniendo de manifiesto la desigualdad en el reparto de los recursos, que ha derivado en los últimos tres años en la creación de grandes brechas sociales y ecológicas. Así, en 2020, año de la pandemia y el confinamiento, la economía mundial se contrajo cerca de un 3 %, y por primera vez en una generación, la pobreza mundial aumentó.



Figura 1. Objetivos de la agenda 2030 [femcet].

De los 17 objetivos, presentados en la figura 1, varios de ellos entrarían directamente en la eficiencia energética (07, 09, 11, 12, 13 y 15), actuando muchos de ellos sobre la emergencia climática. El principal factor de cambio climático está representado por los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y, en particular, tres de ellos, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), siendo el CO₂ el GEI más importante. España se enfrenta en los años venideros al reto de mejorar la eficiencia energética e impulsar la integración de energías renovables, alcanzando la reducción de emisiones netas de GEI, reduciendo su dependencia energética, así como los costes de la energía [mdsocialesa2030-b], dos de los grandes problemas nacionales en el campo de la energía.

En España, la dependencia energética es muy elevada y supone un alto coste en términos económicos, así como una posibilidad menor de competitividad. El grado de dependencia energética de España ha conseguido rebajarse en 2022 a un mínimo histórico, el 68,9%; esto quiere decir que España apenas produce un tercio de la energía que consume, y es el séptimo país europeo más dependiente del exterior para su abastecimiento energético, estando la media europea en el 61%.

Respecto al consumo de energía, una manera de reducirlo es fomentando su uso eficiente por parte de las distintas actividades. Si bien España ha venido mejorando su eficiencia energética especialmente en los últimos años, el aumento de la demanda nos pone hoy frente al reto de ser mucho más eficientes para poder contener las emisiones de gases de efecto invernadero. Si hacemos caso a los datos, la temperatura global aumentará 2,7 °C para fines de siglo, muy por encima de lo estimado en el Acuerdo de París [Ayuda]. El simple hecho de limitar este aumento de temperatura a 2-2,4°C para el año 2050 supone disminuir casi el 60% las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Los edificios son consumidores aproximadamente del 40% de la energía que se genera, y el ahorro de energía potencial que se puede lograr en los mismos oscila entre el 30% y el 80%. Desde el año 2002, la publicación de la primera “Directiva de Eficiencia Energética en Edificios” [EUCO-b] y su aplicación en España a través del “Código Técnico de la Edificación” [MITMA-a], los requisitos en la reglamentación española para edificios contemplan medidas de eficiencia energética cada vez más rigurosas y ambiciosas en aspectos claves ligados a la reducción de la demanda energética del edificio y al consumo de energía. Estas dos medidas están dirigidas a dos de los factores claves de la eficiencia energética de los edificios, su aislamiento y su equipación [AGTECNO3].

La eficiencia energética de un edificio se determina calculando o midiendo el consumo de energía necesaria para satisfacer anualmente la demanda energética del mismo en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación, y se expresa de forma cualitativa o cuantitativa mediante indicadores, índices y calificación, o letras de una escala determinada convencionalmente y que varía de mayor a menor eficiencia [IDAE-b]. A la hora de calcular la eficiencia energética de un edificio se debe tener en cuenta un indicador energético principal y varios complementarios. El indicador energético principal viene dado por dos parámetros principales:

- 1) Emisiones anuales de CO₂.
- 2) Consumo anual de energía primaria no renovable.

En cuanto a los indicadores complementarios, los más habituales son:

- 1) Demanda energética anual de calefacción.
- 2) Demanda energética anual de refrigeración.
- 3) Consumo anual de energía primaria no renovable desagregada por servicios.
- 4) Emisiones anuales de CO₂ desagregada por servicios.
- 5) Emisiones anuales de CO₂ desagregada por consumo eléctrico y por otros combustibles).

Esto da lugar a la correspondiente etiqueta de certificación (figura 2).



Figura 2. Categorías de calificación energética de edificios [IDAE-b].

Sin entrar en la arquitectura bioclimática, la sostenibilidad y la eficiencia energética de los edificios se puede mejorar centrándose en los siguientes ejes:

- 1) Reducción de la demanda energética mediante el correcto aislamiento de la vivienda, que se deberá dirigir hacia fachadas, cubiertas, techos y suelo en primer lugar, y sistemas de ventilación adecuados en segundo lugar.
- 2) Uso de instalaciones con máxima eficiencia energética, especialmente en las instalaciones térmicas.
- 3) Uso de energías renovables, como solares o aerotermia.

La reducción de la demanda energética mediante el correcto aislamiento de los forjados será el objeto de este Trabajo de Fin de Grado. La idea de este trabajo surge en colaboración con la empresa FOREL, donde realicé mi estancia en prácticas, y quienes proporcionaron las bases sobre las que se desarrolla el Trabajo de Fin de Grado.

1.1. Ámbito energético: Marco global y europeo.

En este apartado se introducirá el contexto europeo y mundial referente al ámbito energético y la preocupación por el medio ambiente. En primer lugar, se analizarán las principales medidas mundiales que se han establecido a la hora de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, para posteriormente centrarnos en el ámbito europeo, y principalmente en el sector residencial, en el cual se enfoca este Trabajo Fin de Grado.

1.1.1. El Protocolo de Kyoto.

En 1997, en vista a los elevados niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, se aprobó, el 11 de diciembre, el Protocolo de Kyoto, un acuerdo internacional entre los países de las Naciones Unidas, con el objetivo de reducir estas emisiones [MITECO]. Este acuerdo no entró en vigor hasta el año 2005. El principal objetivo de este acuerdo era el de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 5,2% respecto a los valores de emisiones del año 1990. Para cumplir con este objetivo, se estableció un periodo de 4 años, entre 2008 y 2012. En el año 2012, en Doha, se estableció un segundo periodo de 8 años entre 2013 y 2020, con el objetivo de reducir las emisiones en un 18% respecto a 1990 (enmienda de Doha). Sin embargo, esta enmienda aún no ha entrado en vigor [Galante]. Además del objetivo de reducir los gases de efecto invernadero, otras medidas a adoptar por este protocolo son la reducción de la demanda energética y el incremento de la eficiencia energética [Herrando].

El Protocolo de Kyoto regula 6 principales gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HCF), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). Cada uno de ellos tiene una contribución diferente al calentamiento global, la cual se muestra en la

tabla 1, tomando como referencia el dióxido de carbono (CO₂), al cual se le ha dado un valor unidad.

Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Óxido nitroso	N ₂ O	310
Hidrofluorocarbonos	HCF	140 a 11700
Perfluorocarbonos	PFC	6500 a 9200
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	23900

Tabla 1. Contribución de los diferentes gases de efecto invernadero considerados por el Protocolo de Kyoto [Galante].

Los principales países en los que se enfoca el cumplimiento de los objetivos establecidos por el protocolo son los países con mayor nivel de desarrollo, pasando los países en vías de desarrollo a un segundo plano o quedando exentos de cumplir estas medidas. Los territorios con mayor capacidad para llevar a cabo los cambios pertinentes para reducir estas emisiones son Estados Unidos, los países de la Unión Europea (UE), Japón, Rusia, Canadá, Australia y Nueva Zelanda; que son las principales potencias mundiales desarrolladas.

1.1.2. Europa y el sector residencial.

En la Unión Europea (UE), el establecimiento del protocolo de Kyoto ha llevado a la creación de normativas y leyes para que los distintos países miembros cumplan con este acuerdo. Para ello, es necesario generar modificaciones destinadas a una reducción de las emisiones y a un mayor aprovechamiento de la energía en distintos sectores. Los principales sectores son el transporte, la industria, el sector residencial, el sector servicios y, en menor medida, la agricultura [Odyssee-a].

En la figura 3 se muestra la energía final consumida por cada uno de estos sectores en los años 2000 y 2018. Con esto se puede observar la importancia de cada uno de estos sectores en la energía final que emplean, la cual se relaciona directamente con las emisiones que generan, puesto que, a mayor energía empleada por un sector, mayores cantidades de fuentes de energía (petróleo, gas natural, etc.) necesitará, y emitirá una mayor cantidad de gases de efecto invernadero al ambiente. También se muestra la variación a lo largo del siglo en estos consumos. Los datos se muestran en mega toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe), unidad que equivale a aproximadamente a 11630 kWh [Inega].

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

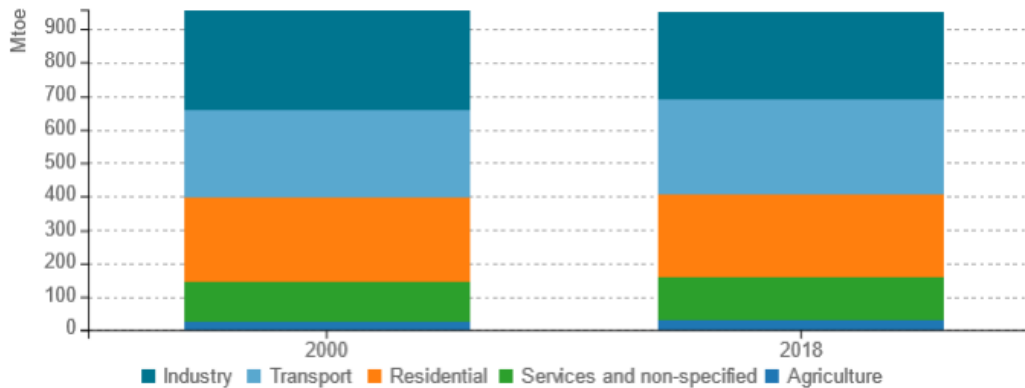


Figura 3. Energía final consumida por sector en la Unión Europea [Odyssee-a].

Desde el año 2000, se ha producido un crecimiento en los sectores del transporte, el cual ha pasado de un 27 a un 30% de la energía consumida en la UE; y del sector servicios, que ha pasado de un 12 a un 14%. El sector industrial ha reducido la energía final consumida de un 31 a un 27% de la total consumida en la UE. Los sectores de la agricultura y residencial han mantenido sus porcentajes en un 3% y un 26% respectivamente [Odyssee-a].

A la vista de estos datos, el sector residencial tiene una gran importancia en la UE en cuanto a la energía que consume, un 26%, situándose muy cerca de la industria y el transporte. Por tanto, es uno de los puntos donde mayor énfasis debe hacerse en Europa a la hora de establecer medidas de eficiencia energética que permitan reducir las emisiones para cumplir con los acuerdos del Protocolo de Kyoto.

Tras la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto, se estableció en la Unión Europea una Directiva sobre el Rendimiento Energético de los Edificios (Energy Performance in Buildings Directive (EPBD)), firmada en el año 2002, conocida como la Directiva 2002/91/CE [EUCO-a]. Esta Directiva se estableció con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y, junto con un aumento en el empleo de fuentes de energía renovable, permitir el cumplimiento de las metas establecidas por el Protocolo de Kyoto [Herrando]; y para que los países miembros implementasen un sistema de certificación energética que permita informar de la calidad energética de los edificios a la hora de construirlos, venderlos o alquilarlos [Vaquero]. Para complementar esta Directiva, se establecieron en 2010 y 2012, las Directivas 2010/31/UE [EUCO-b] y 2012/27/UE [EUCO-c]. La de 2010 establece una metodología de trabajo común para el desarrollo de métodos de cálculo de la eficiencia energética de edificios; y establece que, para el año 2020, todos los edificios de nueva construcción, tanto residenciales como de oficinas o servicios, sean Edificios de Energía Casi Nula EECN (en inglés, Nearly Zero-Energy Building NZEB) [López]. La de 2012 establece que, desde el 1 de enero de 2014, en todos los países miembros de la UE se renueve al menos un 3% del suelo de todos los edificios climatizados cada año [Herrando]. Posteriormente, se propuso revisar la EPBD en el año 2016, y se realizó una refundición en 2018 de las directivas de 2010 y 2012 mediante la Directiva 2018/844 [EUCO-d]. En la figura 4 se puede ver un esquema con la evolución de la Directiva EPBD. [Lakatos]

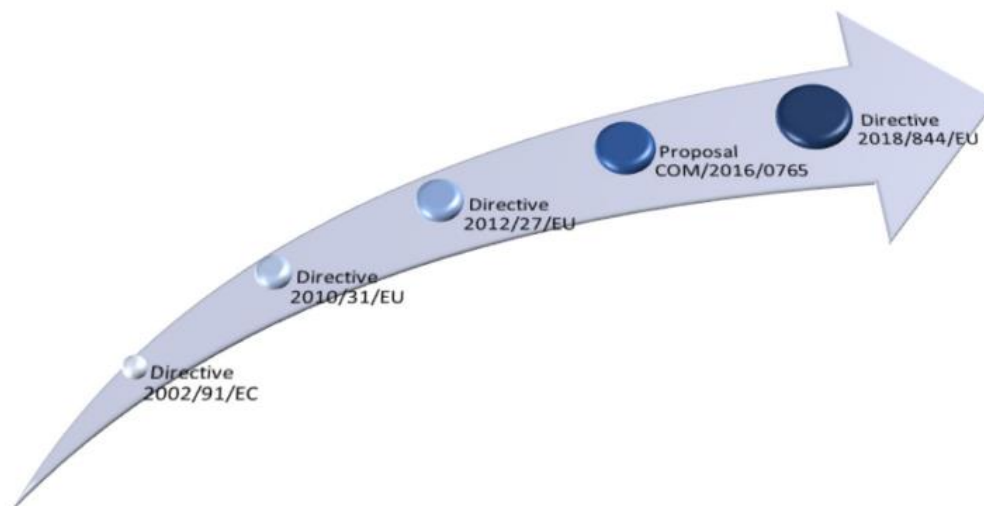


Figura 4. Evolución de la “Energy Performance in Buildings Directive” (EPBD) desde su creación en el año 2002 hasta su última actualización en el año 2018 [Olasolo].

En base a estas Directivas, cada país miembro ha ido generando sus propias normativas y decretos para implementar los objetivos de la Directiva de

Rendimiento Energético de los Edificios EPBD, para mejorar la eficiencia energética de sus edificios y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En España, se estableció el Real Decreto 314/2006 [MV], por el cual se aprobaba el Código Técnico de la Edificación CTE, que establecía los requerimientos básicos para la mejora de la eficiencia energética en los edificios, como los especificados en el Documento Básico DB-HE (DBHE) [López]. Además, se generaron herramientas de certificación energética como la Herramienta Unificada Lider Calener (HULC) o la herramienta de Calificación Energética Residencial Método Abreviado (CERMA) [Semple].

En otros países de la Unión Europea, al igual que en España, se han desarrollado decretos y normativas, además de herramientas y metodologías de cálculo para predecir el comportamiento energético y así poder mejorar la eficiencia energética de sus edificios.

- En Portugal, se estableció en 2006 el Sistema de Certificación Energética de Edificios (SCE), con la aprobación del Decreto Ley 78/2006, y se actualizaron las normativas previas a la creación del EPBD. Posteriormente, en 2013, se produjo una actualización de la normativa nacional con el Decreto Ley 118/2013 [Vaquero].
- En Alemania, se establecieron las metodologías de cálculo DIN 18599 y DIN 4108, aplicadas para los nuevos edificios construidos a partir de 2009 y para edificios ya existentes [Semple].
- En Reino Unido, se creó la normativa “Energy Performance of Buildings” (Gales e Inglaterra) en 2012 y la normativa “Energy Performance of Buildings” (Escocia) en 2008, las cuales adaptaban la normativa vigente anterior al EPBD. Estas normas sirvieron para adaptar la metodología de cálculo creada en 1995, el Standard Assessment Procedure (SAP) [Semple].
- En Francia, en 2014, la Réglementation Thermique RT2012 estableció la metodología de cálculo para la certificación energética de edificios en base al EPBD. Esta, junto con las regulaciones de la RT2006, se han empleado para el cálculo energético de viviendas en este país construidas a partir del año 2006 [Semple].
- En Italia, si bien algunos de los elementos a implementar del EPBD se delegaban a los distintos gobiernos regionales, se establecieron directrices a nivel nacional para establecer una metodología de certificación energética. Los decretos nacionales UNI/TS 11300 y UNI/TS 11552 se emplearon, junto con la herramienta DOCET (Diagnosi e Certificazione Energetica degli Edifici Residenciali Esistenti), sirvieron

para la certificación energética de los edificios ya existentes y de los de nueva construcción a partir de 2009 [Semple].

A continuación, se muestra en la figura 5 un esquema de las diferentes normativas que se han creado en base al Protocolo de Kyoto (nivel mundial) a nivel europeo y nacional.

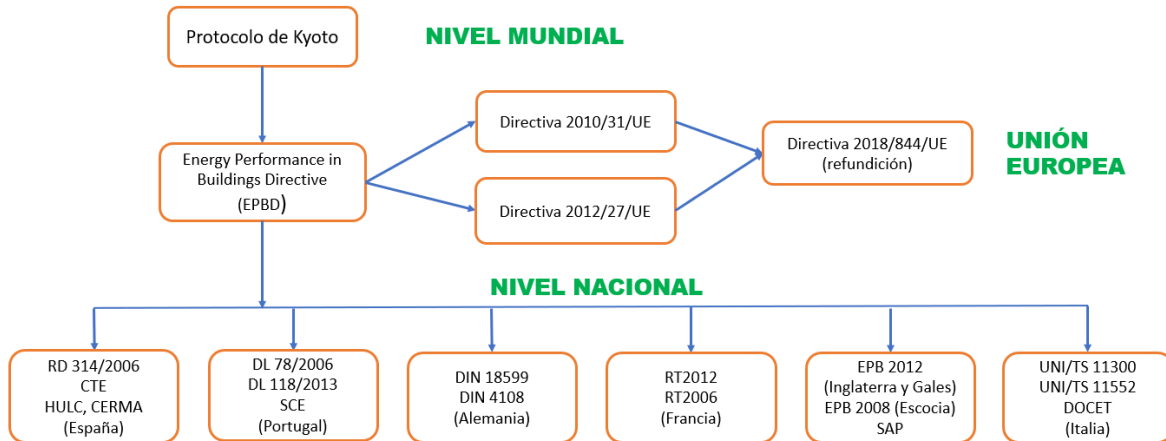


Figura 5. Esquema en el que se refleja la normativa relacionada con la mejora energética desde la escala mundial hasta el nivel nacional dentro de la Unión Europea.

Un estudio realizado en 2014 estableció que todos los países miembros de la Unión Europea habían introducido de manera formal los criterios establecidos por el EPBD en sus normativas nacionales, y 19 de ellos habían creado softwares oficiales para la certificación energética de sus edificios [Herrando].

Sin embargo, existen diferencias entre los distintos países en la efectividad de aplicación de los criterios del EPBD. Mientras que, por ejemplo, Dinamarca ya tenía métodos de certificación energética previos a la instauración del EPBD y en 2010 ya había certificado más de la mitad de sus edificios, otros países aún están a medio camino a la hora de conseguir una plena implementación de sus sistemas de certificación [Herrando]. En general, los países del norte de Europa han sido más eficientes a la hora de generar normas y metodologías de cálculo que los países del sur, de la zona mediterránea, los cuales, al tener un clima más cálido, no requieren tanta energía para climatizar sus edificios, y por tanto no han adaptado con tanta efectividad la normativa del EPBD [Abela].

Aun con estas diferencias entre los distintos países, la normativa EPBD ha generado un impacto positivo energéticamente en la última década. Un estudio realizado en 2021 [Rousselot] muestra una reducción en la energía consumida en las viviendas de la Unión Europea, como se puede ver en la figura 6.

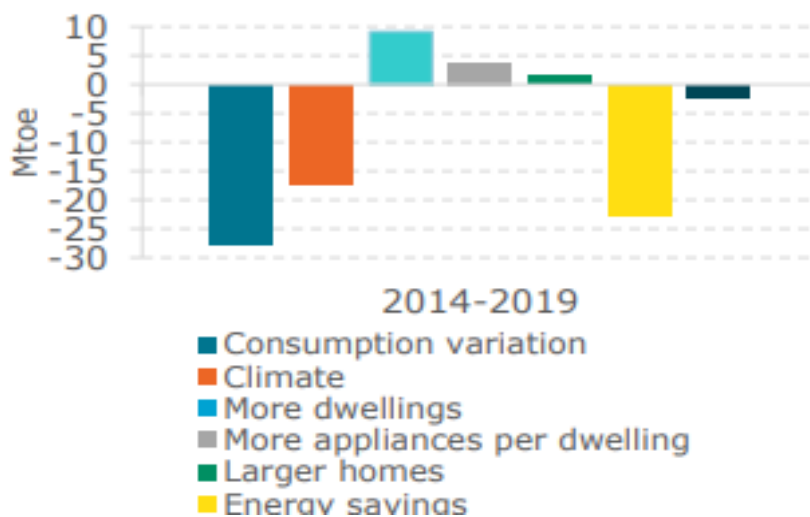


Figura 6. Variación de la energía residencial consumida entre 2014 y 2019 en la Unión Europea [Rousselot].

Aunque la mayor cantidad de viviendas y su mayor tamaño (azul claro y verde), sumado al mayor número de electrodomésticos por vivienda (gris) ha generado un aumento de la energía residencial consumida entre 2014 y 2019 en la Unión Europea de unas 15 Mtoe; la mejora de la eficiencia energética (amarillo) y la mayor calidez del clima en la última década (rojo), además de otros factores, han supuesto una disminución del consumo de energía de alrededor de 43 Mtoe. Este balance ha dado lugar a una reducción global del consumo de energía en la Unión Europea de 28 Mtoe.

La mejora energética que ha supuesto la aplicación de la normativa EPBD es clara, sin embargo, aún queda mucho por hacer. La mayoría de los países de la UE disponen de las herramientas necesarias para implementar la creación de edificios de energía casi nula (NZEB), y se irán implementando cada vez más mejoras en los próximos años. Pero la cantidad de edificios de nueva construcción desde la implementación de esta normativa es pequeña, en comparación con las viviendas ya construidas, por lo que se debe hacer énfasis en la renovación de los edificios ya existentes, para conseguir su certificación energética [Olasolo].

En el apartado siguiente, se muestra con más detalle el desarrollo de normativa en España.

1.2. Marco normativo en España.

Como se ha comentado anteriormente, en España se establece, como herramienta de certificación energética, la Herramienta Unificada Lider Calener (HULC) Este programa HULC, empleado para la estimación de los cálculos energéticos de las viviendas, se rige por una serie de documentos normativos incluidos en el Código Técnico de la Edificación [MITMA-a].

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de habitabilidad establecidos en la ley 38/1999 [MPR].

Además, el CTE constituye un instrumento para la transposición de las normas europeas. La Directiva 2010/31/UE [DO] relativa a la eficiencia energética de los edificios ha sido transpuesta parcialmente al ordenamiento jurídico español mediante las modificaciones del Documento Básico DB-HE [MITMA-b].

Los documentos más relevantes para este Trabajo de Fin de Grado son los siguientes:

- Documento Básico HE de ahorro de energía [MITMA-b].
- Documento Básico HS de salubridad [MITMA-c].
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios [MPR-b].

1.2.1. Documento Básico HE de ahorro de energía.

El objetivo de este documento consiste en establecer las reglas y procedimientos que permiten cumplir el requisito básico de ahorro de energía. Este requisito consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir, asimismo, que una parte de este consumo provenga de fuentes de energía renovables [MITMA-b].

Este documento es de aplicación tanto para edificios de nueva construcción como para la remodelación o la reforma de edificios ya existentes.

El Documento Básico HE se divide en 7 subapartados, llamados exigencias básicas, desde la HE 0 hasta la HE 6, cada una de las cuales se centra en un apartado específico. Estas están recogidas en el artículo 15 de la Parte I del CTE [MITMA-d]. De estas, las dos con mayor relevancia son las exigencias básicas HE 0 y HE 1.

La exigencia básica “*HE 0: Limitación del consumo energético*” establece que el consumo energético de los edificios se limitará en función de la zona climática de su ubicación, el tipo de uso del edificio y, en el caso de edificios

existentes, el alcance de la intervención. Además, el consumo energético se satisfará, en gran medida, mediante el uso de fuentes de energía renovable.

La exigencia básica “*HE 1: Condiciones para el control de la demanda energética*” establece que los edificios dispondrán de una envolvente térmica que limite las necesidades de energía primaria (EP) para garantizar el bienestar térmico en función de la zona climática de su ubicación, del régimen de verano y de invierno, del uso del edificio y, en el caso de edificios existentes, del alcance de la intervención.

1.2.2. Documento Básico HS de salubridad.

El objetivo de este documento consiste en establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir el requisito básico de higiene, salud y protección del medio ambiente. El objetivo de este requisito consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, padezcan molestias o enfermedades, así como el riesgo de que los edificios se deterioren y de que deterioren el medio ambiente [MITMA-c].

Este documento es de aplicación tanto para edificios de nueva construcción como para la remodelación o reforma de edificios ya existentes.

El Documento Básico HS se divide en 6 subapartados, llamados exigencias básicas, desde la HS 1 a la HS 6. Estas exigencias se recogen en el artículo 13 de la parte I del CTE [MITMA-d]. De ellas, las dos que requieren un mayor interés son las exigencias HS 3 y HS 4.

La exigencia básica “*HS 3: Calidad del aire interior*” establece que los edificios dispondrán de medios para que sus recintos puedan ventilarse adecuadamente, de forma que se aporte un caudal suficiente de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión de aire viciado por contaminantes.

La exigencia básica “*HS 4: suministro de agua*” establece que los edificios dispondrán de los medios adecuados para suministrar agua apta para el consumo de forma sostenible.

1.2.3. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), tiene por objeto establecer las exigencias de eficiencia energética y seguridad que deben cumplir las instalaciones térmicas en edificios destinadas a atender la demanda de bienestar e higiene de las personas [MPR-b].

El RITE se divide en dos partes. La parte I contiene las condiciones generales de aplicación del RITE y las exigencias de bienestar e higiene, eficiencia energética y energías renovables y residuales y seguridad que deben cumplir

las instalaciones térmicas. La parte II, constituida por las instrucciones técnicas, contiene la caracterización de las exigencias técnicas y su cuantificación.

1.3. Objetivos.

Tras analizar el marco normativo y el contexto, tanto nacional como europeo, en el que se encuentra situado este Trabajo de Fin de Grado, se proponen en este apartado una serie de objetivos a cumplir durante el mismo:

- Realizar una recopilación y análisis de la normativa europea y española a nivel de eficiencia energética de los edificios, creada a partir del Protocolo de Kyoto.
- Analizar cómo influye el uso de materiales sostenibles y ecológicos como el EPS, en su incorporación en los forjados de un edificio y en el comportamiento energético del mismo.
- Cuantificar, mediante un modelo matemático simplificado como es la herramienta HULC, el nivel de ahorro energético que representa la inclusión de un forjado de EPS en la vivienda, frente a los forjados tradicionales utilizados en España como son el de hormigón y el cerámico. Desglosar la contribución del consumo de energía y las emisiones de CO₂ en calefacción, refrigeración, ACS y ventilación.
- Cuantificar la influencia de la inclusión de una capa aislante de EPS en los forjados de estudio en el ahorro energético total.
- Estimar cómo afecta la inclusión de forjados de EPS y la presencia de una placa de EPS en los forjados, estudiando las diferencias entre el edificio modelo (simplificado) y una vivienda completa (edificio real), en la calificación energética final.

Además de los objetivos propuestos, como objetivos académicos, se incluyen una serie de competencias profesionales asociadas al título de Ingeniero Técnico Mecánico, tanto genéricas como propias de la rama industrial:

- Capacidad de análisis y síntesis.
- Capacidad de expresión escrita.
- Capacidad para aprender y trabajar de forma autónoma.
- Conocimientos básicos y aplicación de tecnologías medioambientales y de sostenibilidad.
- Conocimientos aplicados de ingeniería térmica.
- Trabajo a realizar en una empresa en el ámbito de la Ingeniería Mecánica.

1.4. Presentación documento.

En este apartado se presentará la estructura del Trabajo de Fin de Grado, exponiendo los distintos apartados que irán apareciendo a lo largo de este. Se ha estructurado el documento en seis partes diferentes, incluyéndose en cada una de ellas la siguiente información:

- Apartado 1: en este apartado se analizan tanto el contexto normativo europeo como el nacional en el ámbito de la eficiencia energética, bajo el cual se ha realizado el Trabajo de Fin de Grado. Además, se incluyen los objetivos del mismo.
- Apartado 2: en este apartado se presentan, en primer lugar, una serie de conceptos básicos que irán apareciendo a lo largo del documento. A continuación, se presenta el material en el cual se enfoca el Trabajo de Fin de Grado, el poliestireno expandido (EPS). Se introduce el material, hablando de su sostenibilidad, para pasar a exponer el método de conformado de piezas de EPS, su conductividad térmica (propiedad de interés en el estudio) y sus aplicaciones en construcción.
- Apartado 3: en este apartado se introducen los dos casos de estudio que se analizarán en el Trabajo de Fin de Grado, así como su definición constructiva y los equipos de climatización empleados en los mismos. Como introducción de este apartado se presenta la herramienta de simulación empleada para obtener los datos energéticos de los edificios de estudios.
- Apartado 4: en este apartado se analizan los resultados obtenidos a partir de la herramienta de simulación, y se realiza el estudio comparativo entre los forjados incluidos en los casos de estudio. Además, se ha obtenido la catalogación energética de los dos edificios calculados.
- Apartado 5: en este apartado se exponen las conclusiones del estudio en base a los objetivos propuestos, así como las líneas de futuro, orientadas a una mejora del trabajo.
- Apartado 6: en este apartado se recopila la bibliografía empleada a lo largo del Trabajo de Fin de Grado.

En la figura 7 se muestra un esquema de la estructura del Trabajo de Fin de Grado, donde aparecen de forma resumida la información expuesta en cada uno de los apartados del documento.



Figura 7. Esquema resumen de la estructura del Trabajo de Fin de Grado.

2. Conceptos básicos utilizados y presentación del material principal del estudio.

En este apartado se incluyen la presentación de términos que aparecerán de forma frecuente a lo largo del trabajo, con el objetivo de facilitar la comprensión de los mismos. Posteriormente se pasará a analizar el poliestireno expandido (EPS), el cual es el material principal de este Trabajo de Fin de Grado, ya que es el que se incluirá en los forjados a analizar.

2.1. Conceptos básicos.

En este apartado se presentarán una serie de conceptos que irán apareciendo en el trabajo, y que se han creído necesario explicar previamente de forma resumida.

2.1.1. Forjado reticular.

Se denomina forjado a las particiones horizontales encargadas de distribuir las cargas a los pilares. En el caso del forjado reticular, éste está armado en ambas direcciones, longitudinal y transversal (figura 8), por lo que es capaz de transmitir las cargas en estas dos direcciones, al contrario que el forjado unidireccional, que solo es capaz de transmitir las en una.

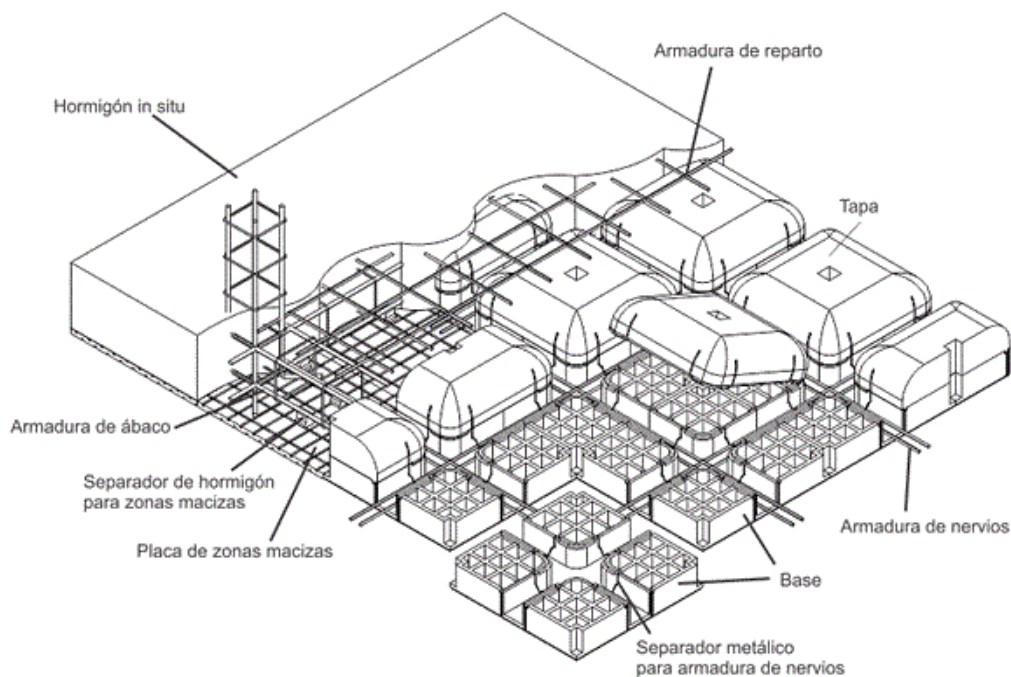


Figura 8. Esquema de un forjado reticular [Forel].

2.1.2. Energía primaria.

La energía primaria (EP) es la Energía suministrada al edificio procedente de fuentes renovables y no renovables, la cual no ha sufrido ningún proceso previo de conversión o transformación. Es la energía contenida en los combustibles y otras fuentes e incluye la energía necesaria para generar la energía final (EF) consumida, incluyendo las pérdidas por su transporte (PT_p) hasta el edificio y las pérdidas de transformación (PT_f) [MITMAb], según se muestra en la Ec. 1.

$$EP = EF + PT_p + PT_f \quad \text{Ec. 1}$$

2.1.3. Demanda energética.

La demanda energética DE será la energía necesaria para mantener en el edificio unas condiciones de confort definidas reglamentariamente, en función del tipo de uso que tenga el edificio (residencial o terciario) y de la zona climática en la que se encuentre situado. Esta se compone principalmente de la demanda de calefacción, correspondiente a los meses fríos; y de la demanda de refrigeración, propia de los meses cálidos [MITMA-b].

2.1.4. Emisiones de CO₂.

Las emisiones de CO₂ se definen como la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera asociada a cada kWh de energía primaria EP producida por los distintos equipos instalados. Estas emisiones varían en función de la fuente de energía empleada para alimentar cada una de las instalaciones del edificio.

2.1.5. Equipo de calefacción.

Es el sistema destinado a la generación de calor en invierno para conseguir unas condiciones de confort reglamentarias establecidas según el tipo de uso del edificio (residencial o terciario) y de la zona climática [MITMA-b]. Este equipo puede emplear distintos tipos de energía primaria para alimentarse.

2.1.6. Equipo de refrigeración.

Es el sistema destinado a la generación de frío en verano para alcanzar unas condiciones de confort reglamentarias establecidas en función del tipo de uso del edificio (residencial o terciario) y de la zona climática del mismo [MITMA-b]. Este equipo puede emplear distintos tipos de energía primaria para alimentarse.

2.1.7. Equipo de Agua Caliente Sanitaria ACS.

Es el sistema destinado a la generación de Agua Caliente Sanitaria ACS. Este equipo se encarga de calentar el agua de red, cuya temperatura depende de la zona climática, a la temperatura de uso, la cual es de 60°C según el DBHE [MITMA-b]. Este equipo puede emplear diferentes fuentes de energía primaria para alimentarse.

2.1.8. Equipo de ventilación.

Sistema destinado a renovar el aire contenido dentro de los espacios del edificio.

2.1.9. Zona climática.

Las zonas climáticas son cada una de las áreas en que se divide la península en función de sus características climáticas. Estas zonas se caracterizan por una letra (α , A, B, C, D, E) y un número (1, 2, 3, 4). La letra hace referencia a la severidad del clima en la época de invierno (siendo D el clima más severo y α el menos severo). El número hace referencia a la severidad del clima en verano (siendo 4 el más severo y 1 el menos severo) [MITMA-b].

2.1.10. Envoltente térmica.

Área compuesta por todos los cerramientos y particiones interiores del edificio, incluyendo los puentes térmicos. Esta delimita todos los espacios habitables del edificio o parte del mismo [MITMA-b].

2.1.11. Puente térmico.

Zona de la envoltente térmica del edificio que presenta una variación de la uniformidad de la construcción, lo cual conlleva una disminución de la resistencia térmica respecto al resto del edificio [MITMA-b]. Los puentes térmicos pueden deberse a un cambio en el espesor de los cerramientos o en los materiales empleados, por la penetración completa o parcial de elementos constructivos con diferente conductividad, por la diferencia entre el área externa e interna de un elemento, etc.

2.12. Relación entre energía primaria consumida y emisiones de CO₂.

Coefficiente que indica la relación entre los kilogramos de CO₂ emitidos a la atmósfera por cada kJ de energía primaria producida por una determinada fuente de energía.

2.13. Bomba de calor.

Una bomba de calor es una máquina térmica que, utilizando un gas refrigerante en un ciclo termodinámico cerrado, transfiere calor del entorno natural (agua, aire o tierra) a un edificio. Además, existen bombas de calor reversibles capaces de extraer calor del edificio y cederlo al entorno [AFEC].

2.2. Poliestireno expandido (EPS).

El Poliestireno Expandido (del inglés Expanded PolyStyrene; EPS) se define técnicamente como un material plástico celular y rígido que se fabrica a partir del moldeo de perlas preexpandidas de poliestireno expandible o uno de sus copolímeros, que presenta una estructura celular cerrada y llena de aire [IDEA]. Esto quiere decir que estas perlas de poliestireno se expanden mediante la

adición de aire y, posteriormente, se moldea mediante distintos procedimientos para obtener piezas de una forma concreta.

Hoy en día, el desarrollo de materiales con buenas propiedades de aislamiento térmico se ha convertido en uno de los principales objetivos para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ a la atmósfera, sobre todo en el sector de la construcción, el cual supone aproximadamente un 40% de la energía consumida y en torno a un 36% de las emisiones de CO₂. En los últimos años, los materiales poliméricos, como los polímeros nanocelulares, han despertado un gran interés debido a su interesante combinación de propiedades, entre las que se incluye una reducida conductividad térmica [Sánchez].

En este contexto, el correcto aislamiento de la envolvente de los edificios es uno de los desafíos principales de la industria, ya que un efectivo aislamiento térmico repercutiría en un gran ahorro energético y, por tanto, en una reducción de emisiones. En Europa, el mercado de materiales de aislamiento se caracteriza por el dominio de dos grupos: los materiales fibrosos inorgánicos y los materiales espumosos orgánicos. En muchos de los países europeos, debido al desarrollo tecnológico en su producción, el material más empleado para el aislamiento de edificios existentes es el poliestireno expandido [Lakatos].

Además de su reducida conductividad térmica, el EPS tiene otras propiedades que lo convierten en un material con futuro en el sector de la construcción, ya que permite ahorros energéticos y una reducción de emisiones respecto a otros materiales más tradicionales ampliamente utilizados, como el hormigón. El EPS, debido a su reducida densidad, ya que se compone en un 98% de aire, se convierte en un material con mayor manejabilidad, por lo que su puesta en obra, su transporte, y su manipulación es más sencilla, ahorrando energía en las primeras etapas de construcción del edificio, como son el transporte de materiales y su puesta en obra [EUMEPS]. Esto reduce las emisiones de CO₂, lo que lo convierte en un material sostenible y ecológico.

Otra propiedad de gran interés es su reciclabilidad. Esta propiedad contribuye a la sostenibilidad de este material. El EPS es 100% reciclable [EUMEPS], aunque es necesario tener conocimiento del sector de empleo del mismo, puesto que su método de reciclaje puede variar en función de si proviene del sector industrial, el sector de la construcción, del comercio, etc. Existen distintos métodos de reciclado del EPS, como pueden ser el reciclado mecánico (trituration), físico por disolución (limpiado de impurezas para posterior reutilización) o químico (regeneración de la materia prima original). Otro método empleado es la incineración, puesto que el EPS no genera gases contaminantes, consiguiéndose así una recuperación energética [ANAPE]. Con

este método de incineración, 1 kg de EPS es capaz de sustituir a 1,4 litros de gasóleo en el proceso de producción de calor [EUMEPS].

A continuación, se presenta su proceso de conformado; su principal propiedad de interés, la conductividad térmica; y sus principales aplicaciones en el sector de la vivienda.

2.2.1. Método de conformado.

Para generar piezas de EPS, bien sean de embalaje o destinadas al sector de la construcción, un método ampliamente empleado es el moldeo por inyección. Este se basa en inyectar las perlas de EPS, ya expandidas, en moldes con la forma buscada. Aplicando presión, temperatura y una cierta cantidad de agua se consigue que las perlas se unan entre sí formando la pieza en cuestión. Este proceso se explicará de manera más amplia en este subapartado.

El primer paso anterior al moldeo es la expansión de las perlas de EPS expandible. Para esto se emplea una máquina llamada preexpansor, el cual se muestra en la figura 9. Las perlas se introducen en ella, junto con un agente expansor, que suele ser pentano [BASF], y se les aplica un tratamiento con vapor de agua caliente. Este vapor de agua permite al agente expansor aumentar el volumen de la perla unas 50 veces su volumen original [BASF], hasta que se consigue la densidad adecuada para la aplicación a la que se vaya a destinar el EPS. Tras este tratamiento, las perlas se llevan hasta un lecho fluido, donde se aplica una corriente de aire que seca la bola y elimina el agente expansor que haya podido sobrar. Una vez secas, las perlas deben reposar un periodo de 24 horas [Turq.].



Figura 9. Preexpansor en fábrica [Turq.].

Las perlas ya preparadas se introducen, mediante un inyector, en moldes cerrados de aluminio, donde se aplica un nuevo tratamiento de vapor de agua

a alta temperatura que, junto a la presión dentro del molde, hace aumentar nuevamente el tamaño de las perlas [BASF], y suelda el EPS formando la pieza. Posteriormente, se inyecta agua fría, se hace vacío y se introduce aire a presión para refrigerar la pieza y ayudar a su correcta extracción del molde sin generarle desperfectos [Turq.]. El proceso se muestra resumido en la figura 10.

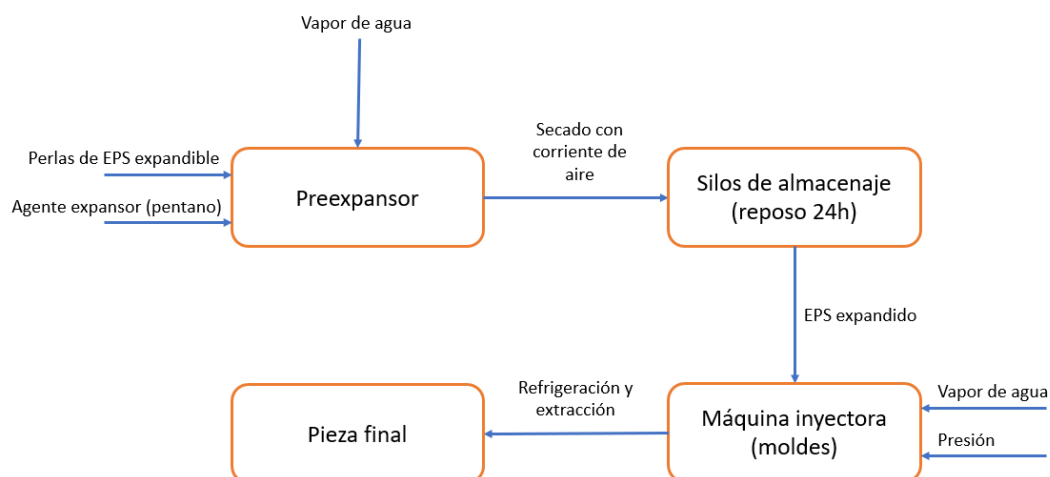


Figura 10. Esquema del proceso de fabricación de piezas de EPS.

2.3.2. Conductividad térmica.

El EPS, al igual que otros materiales, presenta diversas propiedades físicas, como la estabilidad dimensional, la deformación bajo cargas de presión y temperatura, la resistencia a flexión, absorción de agua, etc. Sin embargo, la propiedad que se va a analizar en mayor detalle, puesto que es la que mayor relación guarda con el objetivo de este trabajo, es la conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que indica la capacidad de éste para transmitir calor a través de su estructura. Cuanto mayor sea la conductividad térmica de un material, mayor es su capacidad para transmitir calor; por ello los materiales metálicos, que conducen muy bien el calor, tienen conductividades altas, y materiales como el corcho o el propio EPS, tienen conductividades bajas, por lo que se emplean como materiales de aislamiento térmico. Esta propiedad se representa con la letra k y se expresa en $W/m\cdot K$.

La conductividad k de un material se emplea para calcular el flujo de energía térmica q que se transmite a través de un elemento (una pared, un suelo, etc.)

cuyas caras presentan temperaturas diferentes. Este flujo se calcula mediante la Ec. 2, que es la ley de Fourier para la transferencia de calor.

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \quad \text{Ec. 2}$$

- q es el flujo de calor transmitido en W.
- k es la conductividad térmica del material en W/m·K.
- A es la superficie de cada una de las caras del elemento en m².
- $\delta T/\delta x$ indica el gradiente de temperatura a través del espesor del material en m.

Además, la conductividad de un material también puede variar en función de la temperatura, según la Ec. 3.

$$k = k_0 \cdot [1 + \beta(T - T_0)] \quad \text{Ec. 3}$$

- k es la conductividad del material a la temperatura de cálculo.
- k_0 es la conductividad del material a la temperatura de referencia.
- β es una constante, positiva si k decrece con la temperatura.
- T es la temperatura de cálculo.
- T_0 es la temperatura de referencia.

En el caso del EPS, puede haber variaciones en la conductividad térmica, por lo que cada fabricante debe declarar el valor de la de su producto. Además, la propiedad declarada por cada fabricante debe representar el 90% de los ensayos realizados con un 90% de fiabilidad [IDAE].

A continuación, se muestra la tabla 2, con las conductividades más habituales del EPS en función de su densidad.

Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m·K)
9	0,045
10	0,043
12	0,040
15	0,038
18	0,036
20	0,035
22	0,034
25	0,034
28	0,033
30	0,033
32	0,032
35	0,032
38	0,032
40	0,032
42	0,032
45	0,032
48	0,031
50	0,031
52	0,031
55	0,031

Tabla 2. Valores habituales de la conductividad térmica del EPS en función de su densidad [IDAE].

2.2.3. Aplicaciones del EPS.

El EPS tiene gran cantidad de aplicaciones debido a sus características tanto físicas como químicas, empleándose este en distintos ámbitos como la realización de productos de embalaje o la de recipientes de conserva de alimentos como carne o pescado. Sin embargo, en este apartado nos centraremos en su aplicación dentro del sector de la construcción, donde presenta un gran interés debido a sus propiedades de baja conductividad térmica y ligereza.

Dentro del mundo de la construcción, el EPS tiene dos funciones principales:

- Como material que proporciona aislamiento térmico en particiones verticales (paredes y muros).
- Como material que proporciona aislamiento térmico y elemento aligerante en particiones horizontales (forjados y cubiertas).

En cerramientos verticales, el EPS se emplea para mejorar el aislamiento térmico del edificio, ya que gran parte de las paredes de una vivienda, a

excepción de los cerramientos interiores de la misma o de las medianerías en el caso de que existan otros edificios o viviendas colindantes, se encuentran en contacto directo con el clima exterior.

Este material se incorpora en los cerramientos en forma de placas. Un sistema muy empleado en Europa es el aislamiento exterior con planchas de EPS y recubrimiento a base de revoque armado con un tejido (SATE, Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior). Este método consiste en unir las placas de EPS con mortero a la pared de ladrillo y recubrirlos con el revoque de dispersión armado con un tejido [BASF]. Este procedimiento se muestra de forma gráfica en la figura 11.

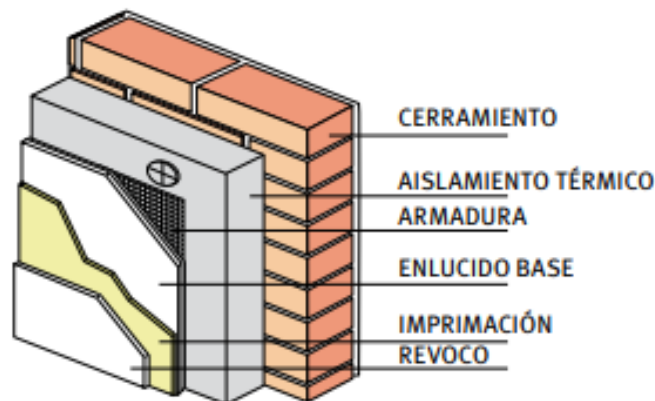


Figura 11. Sistema de aislamiento térmico por el exterior (SATE)
[IDAE].

El otro sistema empleado para introducir el EPS como aislamiento en muros es el aislamiento por el interior del cerramiento. Primero se aplica un enfoscado con mortero para revestir el muro. Las placas de EPS se unen al cerramiento por el interior mediante adhesivos o fijaciones mecánicas. Posteriormente, se aplica sobre el aislamiento un enlucido de yeso [IDEA]. Este procedimiento se muestra en la figura 12.

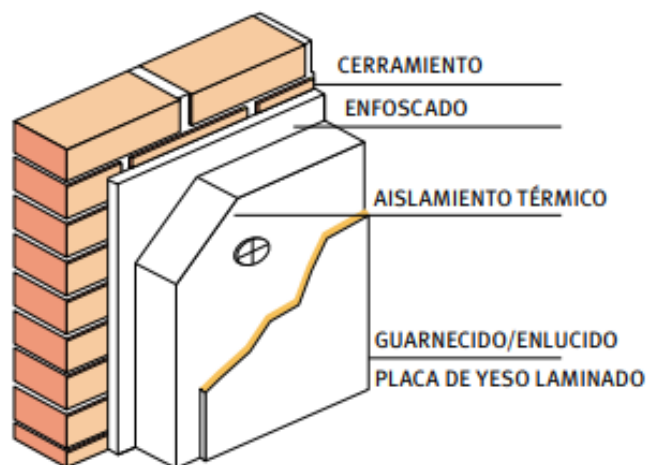


Figura 12. Sistema de aislamiento térmico por el interior [IDAE].

En los cerramientos horizontales, el EPS cumple también una función aislante, al igual que en paredes y muros. En este caso puede introducirse en los cerramientos de dos formas diferentes:

- Como placas, al igual que en los cerramientos verticales, donde actúa como un aislante térmico.
- Como un forjado. Es el caso de los forjados de EPS, que serán objeto de estudio en este trabajo. En este caso cumplen una función constructiva, como lo haría un forjado tradicional de hormigón o cerámico, pero además ofrece un aislamiento térmico mayor y una mayor ligereza al forjado, reduciendo las cargas sobre los pilares de la vivienda.

Como placa de aislamiento, el EPS se emplea principalmente en la cubierta, que es el cerramiento horizontal de la vivienda que se encuentra en contacto directo con el exterior y, por tanto, el que soporta mayores esfuerzos térmicos. Sin embargo, también puede introducirse en los forjados intermedios del interior de la vivienda.

El procedimiento de introducción de las placas de EPS al cerramiento, ya sea una cubierta plana o inclinada, es mediante el uso de adhesivos o bien mediante uniones mecánicas. En el caso de cubiertas inclinadas, las planchas pueden apoyarse sobre los cabios, que son unos listones que atraviesan las vigas de la cubierta, sobre los que se apoyan los materiales que forman el cerramiento, como se observa en la figura 13.

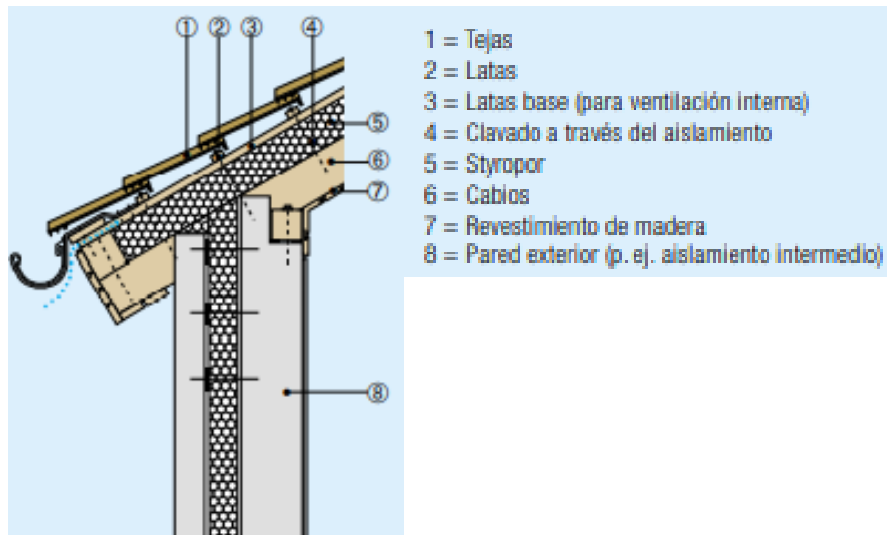


Figura 13. Procedimiento de aislamiento de cubierta inclinada [BASF].

En cuanto a los forjados de EPS, estos se verán en mayor detalle en el apartado 3.3.3.

3. Modelo de estimación del comportamiento energético del edificio.

En este apartado se realizará, en primer lugar, una breve descripción de la herramienta empleada para realizar los cálculos energéticos del edificio. A continuación, se introducirán los tipos de forjados sobre los que se van a realizar las comparaciones y los elementos constructivos que forman los dos casos de estudio que se analizarán, los cuales se describirán ahora. Por último, se hablará sobre los equipos de climatización incluidos en el programa para cada uno de los dos casos de estudio.

3.1. Herramienta de cálculo: Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

Para realizar la simulación energética y la certificación energética de los edificios incluidos en este trabajo se utilizará la herramienta llamada Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

Este programa es una herramienta informática que permite obtener los resultados para la verificación de una serie de exigencias establecidas por el Documento Básico HE (DBHE) del Código Técnico de la Edificación (CTE) [MITMAb]. Esta herramienta se ofrece por el Ministerio de Fomento y por el Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA).

Su desarrollo se debe al Grupo de Termotecnia de la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA), con la colaboración del Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETCC).

Esta herramienta supone la unificación de los anteriores programas empleados, LIDER y CALENER-VYP. Además, incorpora el programa CALENER-GT para la certificación de grandes terciarios (edificios de oficinas y sector terciario de gran tamaño).

La herramienta HULC permite la verificación de las exigencias de los apartados 2.2.1 de la sección HE0, así como el apartado 2.2.1.1 y punto 2 del apartado 2.2.2.1 de la sección HE1 del documento DBHE [MITMAe].

3.1.1. Programas LIDER y CALENER.

En este apartado se hará un breve resumen de los programas previos que unifica HULC. Estos son los programas LIDER y CALENER.

El programa LIDER (limitación de la demanda energética) es una herramienta informática que permite la descripción geométrica, constructiva y operacional de los edificios, así como llevar a cabo la justificación de la sección HE1 del DBHE. Esta herramienta crea de forma automática, a partir de una serie de algoritmos, un edificio idéntico al que se esté estudiando, pero con unas

soluciones constructivas que cumplan las condiciones mínimas del CTE. Con esto es posible la comparación energética entre este edificio y el de estudio [Rey].

Para el cálculo del programa se deben introducir una definición climática (zona climática), geométrica (geometría 3D de la envolvente del edificio), constructiva (materiales y secciones constructivas) y operacional (espacios habitables y no habitables) [Rey].

A partir de estas definiciones, el programa LIDER aporta una serie de resultados que permiten valorar la demanda energética global de calefacción y refrigeración del edificio en kW/m² y así comparar con el edificio de referencia para el cumplimiento del HE1. Además, el programa muestra un informe de la simulación, el cual se puede imprimir [Rey].

El programa CALENER (calificación energética de edificios) es una aplicación adicional al programa LIDER que permite evaluar la eficiencia energética del edificio teniendo en cuenta, además de los datos geométricos y constructivos, los datos de las instalaciones de climatización, ACS e iluminación [Rey].

Este programa dispone de dos versiones en función del edificio a calificar:

- CALENER VyP: para la calificación energética de viviendas, edificios residenciales y pequeño y mediano terciario.
- CALENER GT: para la calificación energética de edificios de grandes dimensiones del sector terciario o de edificios del sector terciario con sistemas energéticos no convencionales.

El método de cálculo es similar al del programa LIDER. Primero, se calculan las emisiones asociadas al consumo del edificio objeto de estudio. Posteriormente, se genera un edificio de referencia igual al de estudio, como ocurría con el programa LIDER, y se calculan sus emisiones asociadas. Por último, si el edificio es residencial, se obtiene la calificación energética del mismo en base a sus emisiones. Si el edificio es del sector terciario o servicios, se realiza una comparación entre el edificio objeto y el de referencia. Esta calificación energética se muestra en forma de letra, siendo A la mejor posible y G la peor posible, para su fácil comprensión. Además, se obtiene un documento administrativo consistente en una descripción de las características energéticas del edificio y una relación de la eficiencia energética de los componentes y subsistemas del mismo [Rey].

3.1.2. Etapas desarrolladas por la herramienta HULC.

Para obtener la certificación energética y la calificación energética del edificio se deben seguir una serie de pasos a la hora de definir el edificio en la herramienta HULC.

En primer lugar, deben establecerse una serie de parámetros generales. Estos son los siguientes:

- Se debe indicar si el edificio es de nueva construcción o se trata de un edificio ya existente.
- Indicar la localidad en que se sitúa el edificio, así como su altitud y la zona climática en que se encuentra. Las zonas climáticas se definen en el DBHE [MITMAb].
- Indicar el tipo de edificio, si es una vivienda unifamiliar o un bloque. En el caso de ser un bloque de viviendas es necesario establecer el número de viviendas que tiene.
- Introducir el caudal de ventilación del edificio, cuyo cálculo se especifica en el apartado 3.4 de este Trabajo de Fin de Grado.

En la figura 14 se puede ver la forma de introducir estos parámetros generales en el programa.

The screenshot displays the 'Definición del caso' (Case Definition) section of the LIDER CALENER (HULC) software. It is divided into several sub-sections:

- Verificación CTE-HE(2019) y Certificación de Eficiencia Energética:** Contains radio buttons for 'Edificio NUEVO', 'Edificio EXISTENTE: Ampliación', 'Edificio EXISTENTE: Cambio de uso', and 'Edificio EXISTENTE: Reforma'. Under 'Edificio EXISTENTE: Reforma', there are options for energy envelope improvements (> 25% and < 25%) with or without changes to HVAC and ACS systems.
- Solo Certificación de Eficiencia Energética:** Includes a radio button for 'Edificio EXISTENTE: Solo Certificación'.
- Localidad, Datos Climáticos:** A form with input fields for 'Comunidad autónoma' (Castilla y León), 'Provincia' (Valladolid), 'Localidad' (Valladolid), and 'Altitud' (700,00 m). It also features a dropdown for 'Zona climática' (D2) and radio buttons for 'Peninsular' and 'Extrapesinular'.
- Tipo de edificio:** Radio buttons for 'Vivienda unifamiliar', 'Viviendas en bloque' (with a 'Número de viviendas' input field set to 18), 'Edificio Terciario Pequeño o Mediano (PMT)', and 'Gran Edificio Terciario (GT)'. Sub-options are provided for 'Una Vivienda de un bloque', 'Un local de un Edificio PMT', and 'Un local de un Edificio GT'.
- Ventilación del edificio residencial:** Includes a 'Caudal de ventilación del edificio o vivienda [litros/s]' input field (144,00), a 'Permeabilidad por defecto' section with a 'Permeabilidad del edificio o vivienda actual, n50, [renh]' input field (4,04), and a checked checkbox 'El edificio tiene una envolvente mejorada con baja permeabilidad al aire'. There is also an unchecked checkbox for 'Valor de permeabilidad mediante ensayo'.
- Valores por defecto de los espacios habitables:** A dropdown menu for 'Tipo de Uso' set to 'Residencial'.

Figura 14. Parámetros generales a introducir en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

Después, es necesario definir los materiales que se emplearán y, a partir de éstos, generar los cerramientos y particiones que formarán la envolvente térmica del edificio objeto. El programa incorpora una librería con gran cantidad de materiales, pero es posible tanto su modificación como la creación de materiales introduciendo sus propiedades. También se deben incluir los puentes térmicos que se consideren necesarios. En la figura 15 puede verse un ejemplo de un cerramiento generado en la herramienta HULC.

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

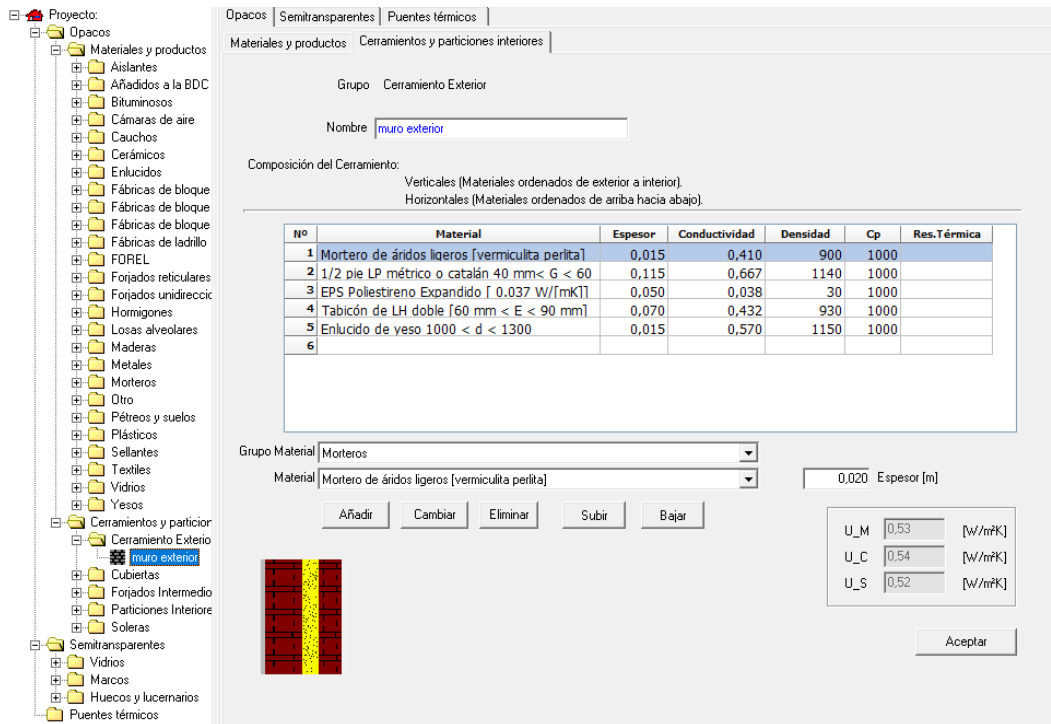


Figura 15. Cerramiento correspondiente a un muro generado a partir de la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

Una vez creados los cerramientos y elementos constructivos, se debe realizar el modelado y orientación en 3D del edificio, generando sus espacios, incluyendo las simplificaciones pertinentes y asociando los cerramientos creados con anterioridad a las particiones del edificio modelado. Si fuese necesario, deben incluirse los obstáculos y elementos de sombra que pueda haber en el entorno. En el apartado 3.2 de este documento pueden verse los modelados de los dos edificios de estudio en el programa HULC.

Una vez realizada la definición geométrica del edificio, así como sus distintos elementos, el programa puede verificar, siempre que sea aplicable, el cumplimiento de las exigencias de la sección HE1 del DBHE. En la figura 16 se muestra un ejemplo del cumplimiento de esta sección.

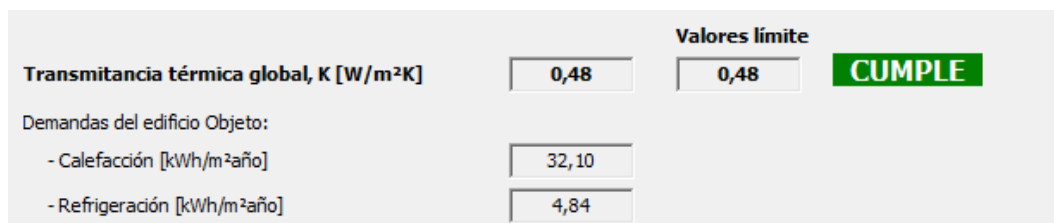


Figura 16. Ejemplo del cumplimiento de las exigencias del apartado HE1 en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

Para obtener la calificación energética del edificio deben definirse los distintos equipos de climatización necesarios (calefacción, refrigeración y ventilación), así como el equipo destinado a generar Agua Caliente Sanitaria (ACS). El programa permite establecer el tipo de sistema que se introduce en el edificio, así como sus principales características. En el caso de que se esté calificando un edificio terciario, es necesario también incluir el sistema de iluminación. En la figura 17 se muestra un ejemplo de la definición de los equipos de climatización para un edificio.

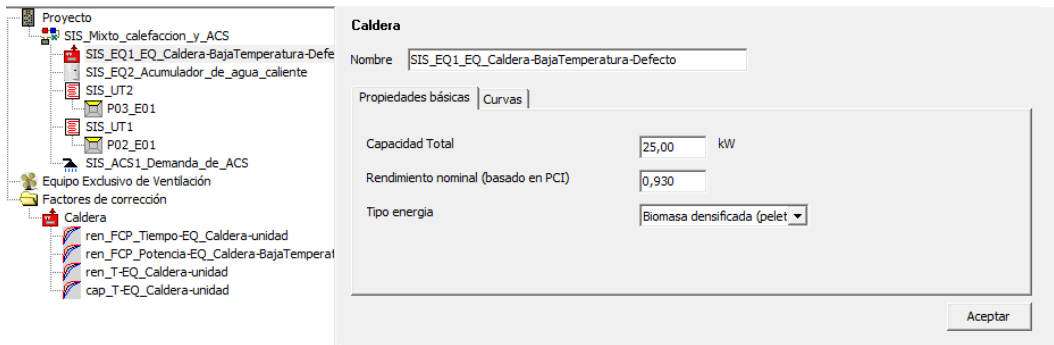


Figura 17. Ejemplo de definición de equipos de climatización en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

Una vez introducidos los equipos de climatización y de ACS, el programa verifica, siempre que sea aplicable, el cumplimiento de la exigencia HEO del DBHE. En la figura 18 se muestra un ejemplo de esta verificación.

HEO		Valores límite		
Consumo EP no renovable [kWh/m ² .año]	9,80	43,00		CUMPLE
Consumo EP total [kWh/m ² .año]	70,50	86,00		CUMPLE
Número de horas fuera de consigna	0	350		CUMPLE
Superficie útil de cálculo, A _{útil} [m ²]	128,00			

Figura 18. Ejemplo de verificación de la sección HEO en la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

Por último, el programa permite seleccionar la opción de generar un informe administrativo, el cual genera un documento en formato PDF donde se muestra la calificación energética del edificio. En la figura 19 se muestra un ejemplo de esta certificación.

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE (kWh/m ² ·año)		EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (kgCO ₂ /m ² ·año)	
<=67.70 A	9,77 A	<15.10 A	1,87 A
67.70-104. B		15.10-23.2 B	
104.00-155.2 C		23.20-34.50 C	
155.20-231.10 D		34.50-51.50 D	
231.10-442.60 E		51.50-102.30 E	
442.60-517.80 F		102.30-119.70 F	
=>517.80 G		=>119.70 G	

Figura 19. Ejemplo de calificación energética de un edificio obtenida mediante la Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC).

3.2. Casos de estudio.

Se realizará una simulación energética sobre dos casos diferentes. El primero, al que se llamará **caso A**, es un edificio simplificado generado desde cero mediante la herramienta de cálculo. Este se sitúa en la ciudad de Valladolid, a una altura de 700 metros, por lo que le corresponde una zona climática D2 [MITMA-b]. Este es un bloque de viviendas, dividido en dos plantas, con 18 estancias interiores que se corresponden con las 18 viviendas del bloque. Sus dimensiones son de 30 x 24 m y su altura es de 8 metros, teniendo cada planta 4 metros de altura. Ambas plantas se encuentran sobre rasante, es decir, sobre la superficie. La superficie total construida del edificio es de 1440 m², disponiendo cada planta de 720 m². La cubierta tiene también 720 m² de superficie no transitable, únicamente empleada para labores de mantenimiento. La potencia instalada procedente de fuentes renovables se ha calculado a partir de la Ec. 4, establecida en la sección HE5 del DBHE [MITMAb], la cual resulta ser de 7,20 kW. En la Ec. 4, la potencia mínima renovable instalada (PMRI) se calcula a partir del factor de producción eléctrica ($F_{pr,el}$), al cual se le asigna un valor de 0,005 kW/m² para edificios de uso residencial privado; y la superficie construida del edificio (S) en m².

$$PMRI = F_{pr,el} \cdot S \quad \text{Ec. 4}$$

A continuación, se muestra en la figura 20 una imagen del modelado del edificio correspondiente al caso A.

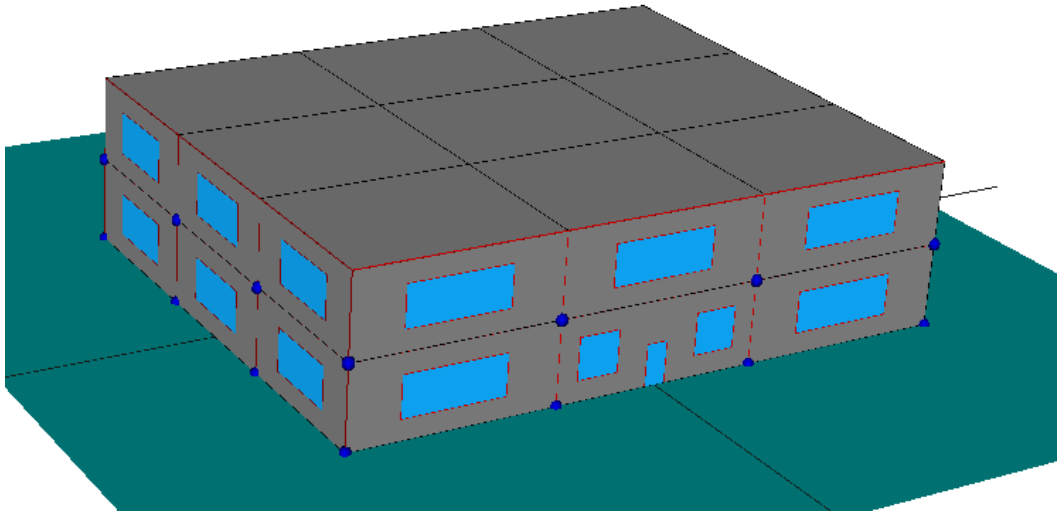


Figura 20. Edificio correspondiente al caso A, modelado mediante la herramienta HULC.

El segundo edificio, al que se llamará **caso B**, es una vivienda unifamiliar generada ya en la herramienta y extraída de la página web del CTE [Rodríguez]. Este edificio, aunque también es virtual, lo llamaremos edificio real para distinguirlo del caso A. Este se encuentra situado en la localidad de Albarracín, en Teruel, a una altura de 1200 m, por lo que le corresponde una zona climática E1, según el DBHE [MITMA-b]. La vivienda tiene unas dimensiones de 8 x 8 m, por lo que la superficie de cada planta será de 64 m². Consta de tres plantas, una primera que es una cámara sanitaria, no habitable, de 1 m de altura; una segunda planta de 4 m de altura; y una tercera planta bajo cubierta, con una altura equivalente de 3,33 m, ya que esta cubierta se encuentra inclinada [Rodríguez]. En este edificio no se especifica la potencia instalada procedente de fuentes renovables, aunque según la Ec. 4, y teniendo en cuenta las medidas del edificio y su uso residencial privado, debería ser al menos de 0,96 kW. En la figura 21 se muestra la vista del modelado de la vivienda correspondiente al caso B.

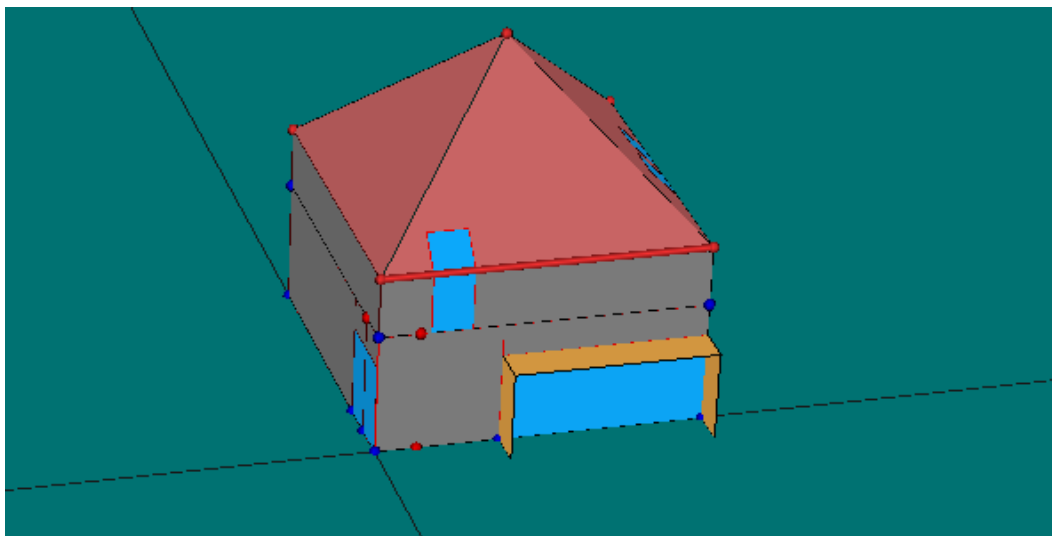


Figura 21. Edificio correspondiente al caso B, modelado mediante la herramienta HULC.

3.3. Elementos constructivos y forjados.

En este apartado se comentarán los distintos elementos constructivos empleados en los dos casos de estudio. Estos son los cerramientos verticales (muros exteriores y particiones interiores), así como las ventanas y puertas. También se expondrán los tres tipos de forjado sobre los cuales se realizará la comparación energética posterior, y los cuales son el elemento principal del Trabajo de Fin de Grado. En un primer apartado se expondrán los elementos constructivos del caso A, correspondiente al edificio simplificado; luego se hará lo propio con el caso B, correspondiente al edificio real; y por último se presentarán los tres tipos de forjado analizados en el apartado 4, además de la placa de aislamiento de EPS, la cual se empleará como elemento aislante en los forjados y cubierta del caso A, y se analizará su influencia energética en el apartado 4. Todos estos elementos se muestran con mayor detalle en el Anexo A, en el cual se muestran imágenes del programa HULC con los distintos elementos desglosados en sus diferentes capas.

3.3.1. Elementos constructivos del caso A (edificio simplificado).

En el caso A se distinguen cuatro tipos de cerramientos, sin contar con los cerramientos horizontales (forjados y cubierta), los cuales se expondrán en el apartado 3.3.3.

- Muros exteriores.
- Particiones interiores.
- Ventanas.
- Puerta principal.

El primer cerramiento es el correspondiente a los muros exteriores, es decir, aquellos que se encuentran en contacto directo con el exterior. Para generar este cerramiento se ha optado por un sistema de aislamiento térmico intermedio. El cerramiento cuenta con dos capas de ladrillo, de 115 y 70 mm con una capa de 50 mm de EPS de aislamiento intermedia, con una conductividad de 0,038 W/mK. Por el exterior se ha dado un revoco de mortero, y el interior se ha acabado con un enlucido de yeso. La transmitancia térmica de este cerramiento es de 0,53 W/m²K. En la figura 22 pueden observarse en color rojo los cerramientos verticales correspondientes a muros exteriores.

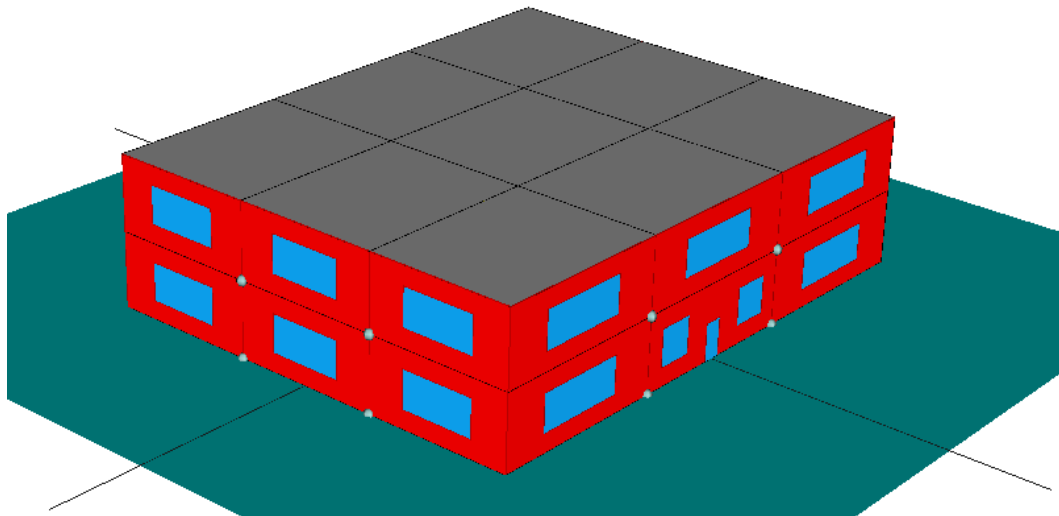


Figura 22. Vista de los cerramientos correspondientes a los muros exteriores, en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).

Para las particiones interiores, es decir, las paredes situadas en el interior del edificio, las cuales dividen las distintas estancias de este, se ha empleado un cerramiento consistente en dos tabicones de ladrillo con una capa de aislamiento de lana mineral con conductividad de 0,04 W/mK. Como acabado se ha empleado un enlucido de yeso por ambos lados del cerramiento. La transmitancia térmica global de este cerramiento es de 0,78 W/m²K. En la figura 23, marcados en color rojo, se pueden observar donde se sitúan estos cerramientos en el edificio.

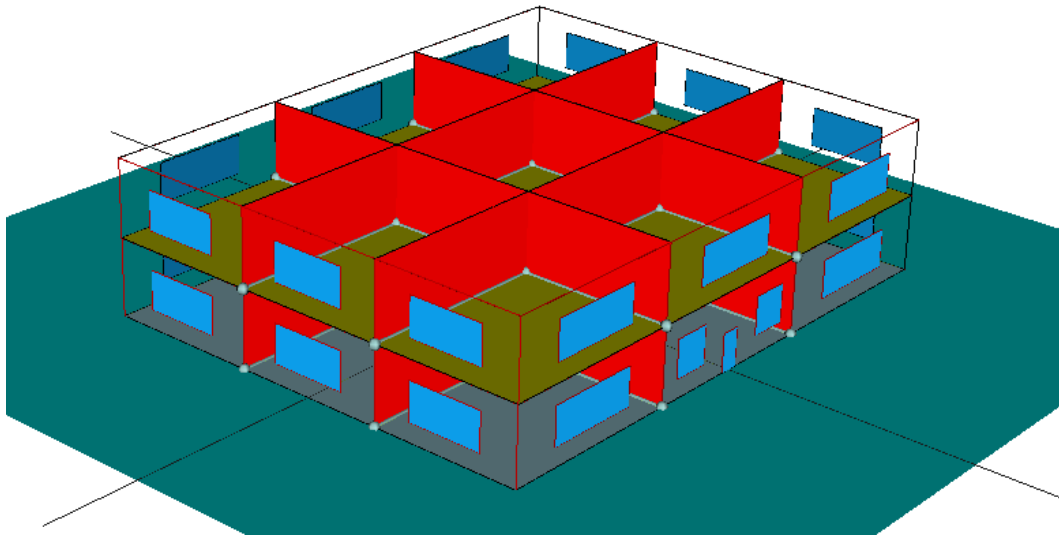


Figura 23. Vista de los cerramientos correspondientes a las particiones interiores, en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).

En cuanto a las ventanas, se han empleado vidrios monolíticos con marcos metálicos sin rotura de puente térmico. Con esto se obtienen unas ventanas con una transmitancia térmica global de $6,27 \text{ W/m}^2\text{K}$. En la figura 24 se pueden observar, en color rojo, las ventanas incluidas en el edificio simplificado.

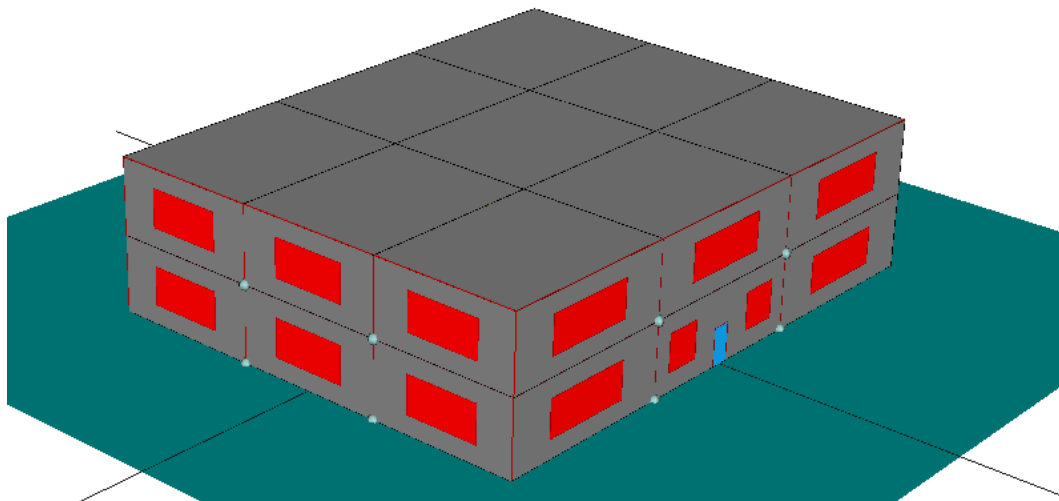


Figura 24. Vista de los cerramientos correspondientes a ventanas, en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).

Para generar la puerta de entrada al edificio, que es la única que se ha considerado, puesto que las simplificaciones introducidas incluyen la generación de los espacios correspondientes a cada una de las viviendas del interior del edificio, sin incluir puertas ni cerramientos dentro de cada una de las viviendas por separado, se ha optado por una puerta de madera de densidad media – alta. La transmitancia térmica de esta es de $2,42 \text{ W/m}^2\text{K}$. Esta puerta puede verse, en color azul, en la figura 24.

3.3.2. Elementos constructivos del caso B (edificio real).

En este caso se distinguen seis cerramientos diferentes, sin contar con los forjados y la cubierta.

- Solera de la cámara sanitaria.
- Muros de la cámara sanitaria.
- Muros exteriores.
- Lucernarios.
- Ventanas.
- Puerta de acceso.

Los cerramientos correspondientes a la solera y los muros de la cámara sanitaria se encuentran bajo el nivel del suelo, a un metro de profundidad. La solera de la cámara sanitaria consta de una primera capa de arena y grava que sirve de base; una pequeña capa de PVC (cloruro de polivinilo), el cual es un material plástico que cumplirá una función de impermeabilización; y una capa de hormigón en masa. Esta solera tendrá una transmitancia térmica global de $2,98 \text{ W/m}^2\text{K}$.

En cuanto a los muros de la cámara sanitaria, los cuales, al situarse bajo tierra, no están en contacto con el aire exterior, sino con el terreno, constan de una capa de ladrillo con un revoco de betún. La transmitancia térmica global de este cerramiento es de $1,76 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Para generar los muros exteriores, es decir, aquellos en contacto directo con el exterior, se ha generado un sistema de aislamiento por el exterior (SATE). Este cerramiento consta de una pared de ladrillo aislada por su cara externa con una capa de EPS de conductividad $0,038 \text{ W/mK}$. En la cara exterior se ha incluido un revoco de mortero y, por la cara interior, una cámara de aire intermedia entre la pared de ladrillo y el enlucido de yeso final. En la figura 25, en color rojo, puede verse donde se ha situado este tipo de cerramiento.

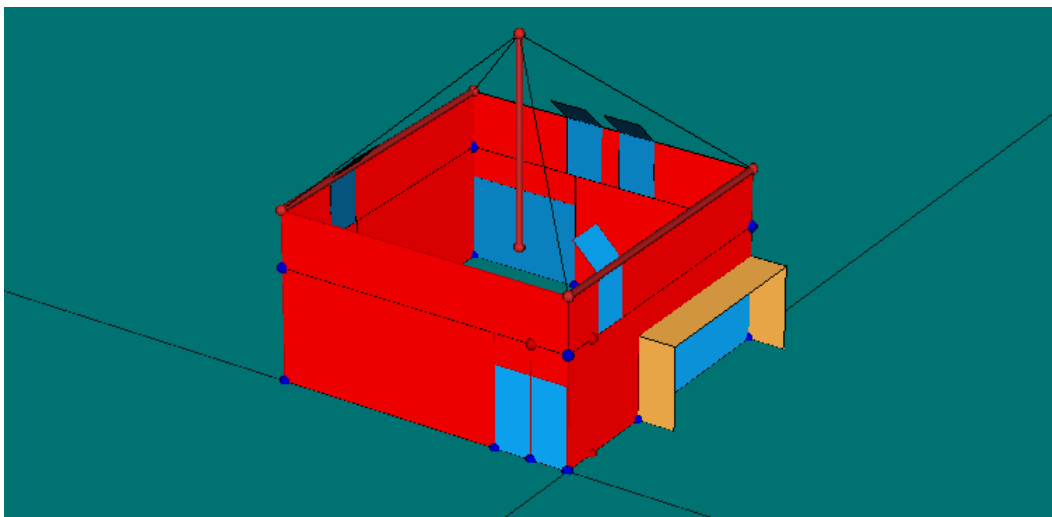


Figura 25. Vista de los cerramientos correspondientes a los muros exteriores, en color rojo, para el caso B (edificio real).

Para generar los lucernarios, que son las ventanas situadas en la cubierta de la vivienda, se han empleado dos tipos de vidrios, en función de la orientación de los mismos. Para los lucernarios de las cubiertas este y sur se ha empleado un vidrio con una transmitancia térmica de $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor solar de 0,42. El factor solar, determinado por la letra g , indica la opacidad del acristalamiento. Se calcula como el cociente entre la radiación que se introduce en el edificio a través del acristalamiento y la que entraría si el vidrio se sustituyese por un hueco totalmente transparente [MITMA-b]. Para los lucernarios de la cubierta se emplea un vidrio con la misma transmitancia térmica, pero un factor solar de 0,61. Todos los lucernarios disponen de un marco de madera de densidad media – alta. Por tanto, la transmitancia térmica de los lucernarios será idéntica para todos, variando solo la cantidad de radiación solar que pasa a través de ellos, determinada por el factor solar. La transmitancia térmica global de los lucernarios es de $1,27 \text{ W/m}^2\text{K}$. En la figura 26 pueden verse, en color rojo, los cerramientos correspondientes a los lucernarios, situados en la cubierta inclinada.

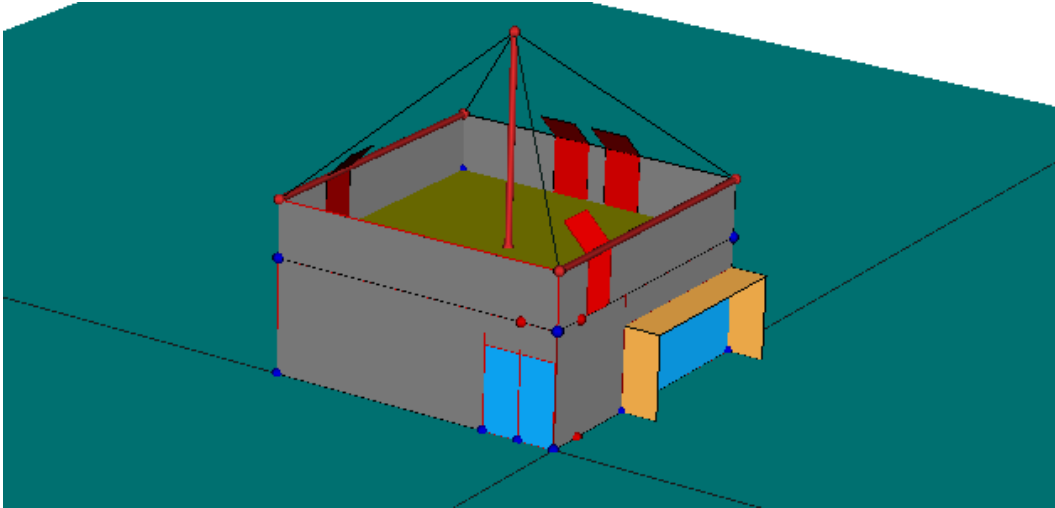


Figura 26. Vista de los cerramientos correspondientes a los lucernarios, en color rojo, del caso B (edificio real).

Para generar las ventanas de la planta baja se ha seguido un procedimiento similar al empleado en los lucernarios. Las ventanas orientadas al norte y al este tienen un factor solar de 0,61, y las orientadas al oeste y al sur de 0,42. La transmitancia térmica de los vidrios de todas las ventanas es de $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Todas las ventanas disponen de un marco de PVC, con lo que la transmitancia térmica Global es de $1,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. En la figura 27 se muestran, en rojo, los cerramientos correspondientes a las ventanas.

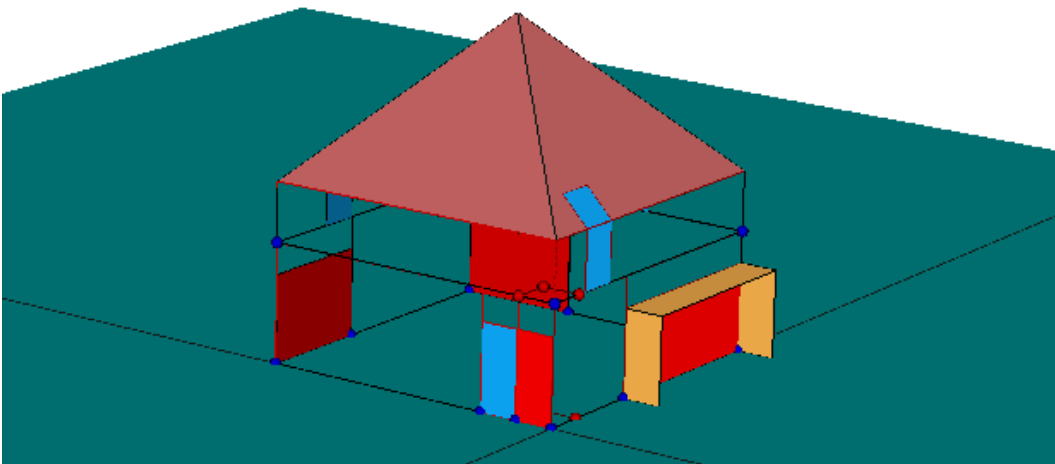


Figura 27. Vista de los cerramientos correspondientes a las ventanas, en color rojo, del caso B (caso real).

Para la puerta de acceso a la vivienda se ha escogido una de madera de densidad media – alta, con lo que se obtiene una puerta con una transmitancia

térmica de 2,20 W/m²K. Esta puerta de acceso se muestra en color azul en la figura 27.

3.3.3. Forjados, cubiertas y placa de EPS.

En este apartado se expondrán, en primer lugar, los forjados que se van a introducir en los dos casos de estudio para su análisis energético comparativo, así como la placa de EPS que se introducirá en los forjados y cubiertas del caso A para estudiar su influencia. Posteriormente se comentarán, como se ha hecho en los apartados 3.3.1. y 3.3.2., las capas de los forjados y cubiertas para los casos A y B. Al igual que con los apartados 3.3.1. y 3.3.2. los cerramientos pueden verse con mayor detalle en el anexo II.

Se analizarán tres tipos distintos de forjado, los cuales se incluirán en los dos casos de estudio y se observarán las diferencias en el comportamiento energético de estos en función del tipo de forjado empleado. Los tres forjados de este Trabajo de Fin de Grado son los siguientes:

- Forjado de hormigón.
- Forjado cerámico.
- Forjado de EPS.

Las diferencias entre estos tres tipos de forjados es el material del que estarán fabricadas las bovedillas del mismo. Las del primero son de hormigón, las del segundo están fabricadas con un material cerámico y las terceras son de poliestireno expandido (EPS). El material con el que están hechas las bovedillas, además de proporcionar un peso propio al forjado diferente, otorgará al forjado una transmitancia térmica distinta. En la tabla 3 se muestran las principales características de estos forjados.

	Espesor (mm)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m ³)
Forjado de hormigón	300	1,947	1670
Forjado cerámico	300	1,678	1580
Forjado de EPS	300	0,470	1330

Tabla 3. Principales características de los tres forjados de estudio del Trabajo de Fin de Grado.

Las medidas de los tres forjados son iguales, ya que todos tendrán un espesor de 300 mm. Las diferencias entre ellos se encuentran en las conductividades

térmicas y las densidades. El forjado de hormigón tiene una conductividad de 1,947 W/mK y una densidad de 1670 kg/m³. El forjado cerámico tiene una conductividad de 1,678 W/mK y una densidad de 1580 kg/m³. El forjado de EPS tiene una conductividad de 0,470 W/mK y una densidad de 1330 kg/m³.

La placa que se añadirá a los forjados del caso A para estudiar su influencia es una placa de EPS, de conductividad 0,038 W/mK y un espesor de 30 mm. Esta se incluirá como aislamiento térmico únicamente en los forjados del caso A, ya que en el caso B se incluye ya una capa de aislamiento de poliestireno extruido (XPS), por lo que no es necesario introducir una placa de aislamiento.

A continuación, se muestran las capas empleadas en los forjados y las cubiertas de ambos casos. En el caso A se distinguen tres tipos distintos de cerramientos horizontales para formar los forjados y cubiertas.

- Solera (primera planta).
- Forjado intermedio (segunda planta).
- Cubierta.

La solera consta, además del forjado correspondiente y la placa de aislamiento de EPS, de una capa de tierra vegetal y otra de hormigón en masa que actúan como base, posteriormente el forjado y la placa, una capa de reparto de hormigón, una capa de PVC que actúa como impermeabilización y un parquet de conífera ligera.

El forjado intermedio está formado, desde abajo hacia arriba, por un enlucido de yeso, que actúa como techo de la primera planta, la placa de EPS y el forjado correspondiente, una capa impermeabilizadora de PVC, una capa de mortero y un parquet de conífera ligera que actúa como suelo de la segunda planta.

La cubierta está formada, de abajo hacia arriba, de un enlucido de yeso, que actúa como techo de la segunda planta, la placa de EPS y el forjado, una capa de PVC, otra de mortero y finalmente baldosas cerámicas, que formarán la cubierta plana del tejado.

En la figura 28 se pueden ver en color rojo los cerramientos correspondientes a la solera, el forjado intermedio y la cubierta.

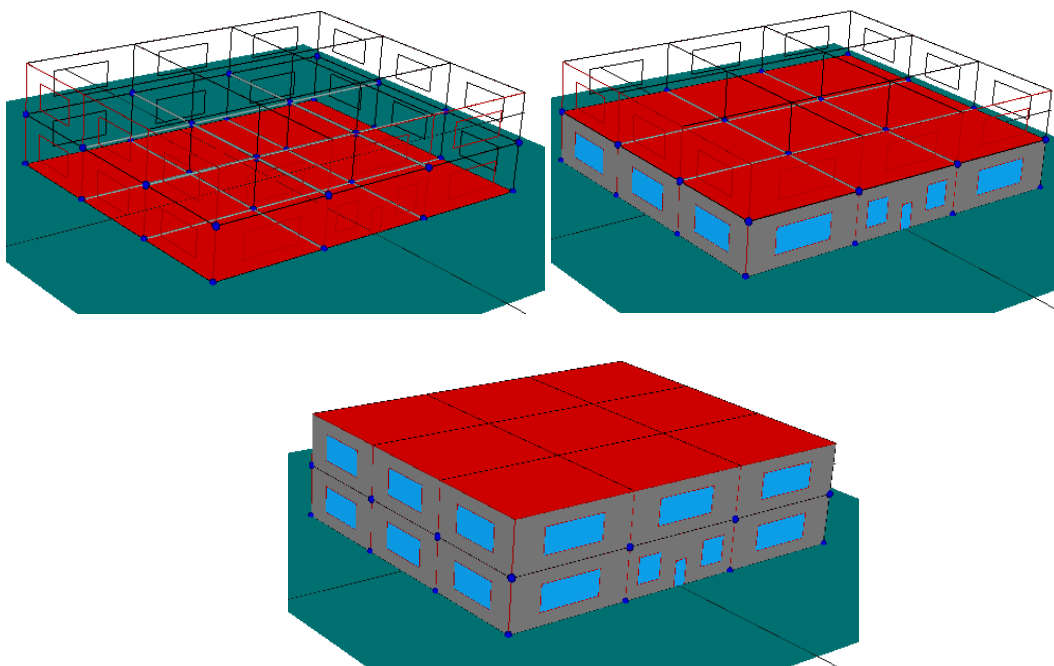


Figura 28. Vista de los cerramientos correspondientes a la solera (arriba izquierda), forjado intermedio (arriba derecha) y cubierta (abajo), en color rojo, para el caso A (edificio simplificado).

En el caso B, correspondiente al edificio real, se diferencian tres tipos distintos de cerramientos para formar los forjados y la cubierta.

- Forjado con cámara sanitaria (planta baja).
- Forjado interior (planta bajocubierta).
- Cubierta inclinada.

El forjado de la cámara sanitaria consta, desde abajo hacia arriba, del forjado correspondiente, la capa de aislamiento de XPS, una capa de mortero y una serie de baldosas que actúan como suelo de la planta baja.

El forjado de la planta bajocubierta está formado, de abajo hacia arriba, por una placa de yeso laminado, que actúa como techo de la planta baja, una cámara de aire, el forjado correspondiente, la placa de aislamiento de XPS, una capa de mortero y una serie de baldosas, que formarán el suelo de la planta bajocubierta.

La cubierta consta, de abajo hacia arriba, de una placa de yeso laminado, que será el techo de la planta bajocubierta, el forjado correspondiente, una lámina de betún impermeable, la capa aislante de XPS, una cámara de aire y una serie de tejas de arcilla que forman el tejado.

A continuación, se incluye la figura 29 donde se pueden observar estos cerramientos en color rojo.

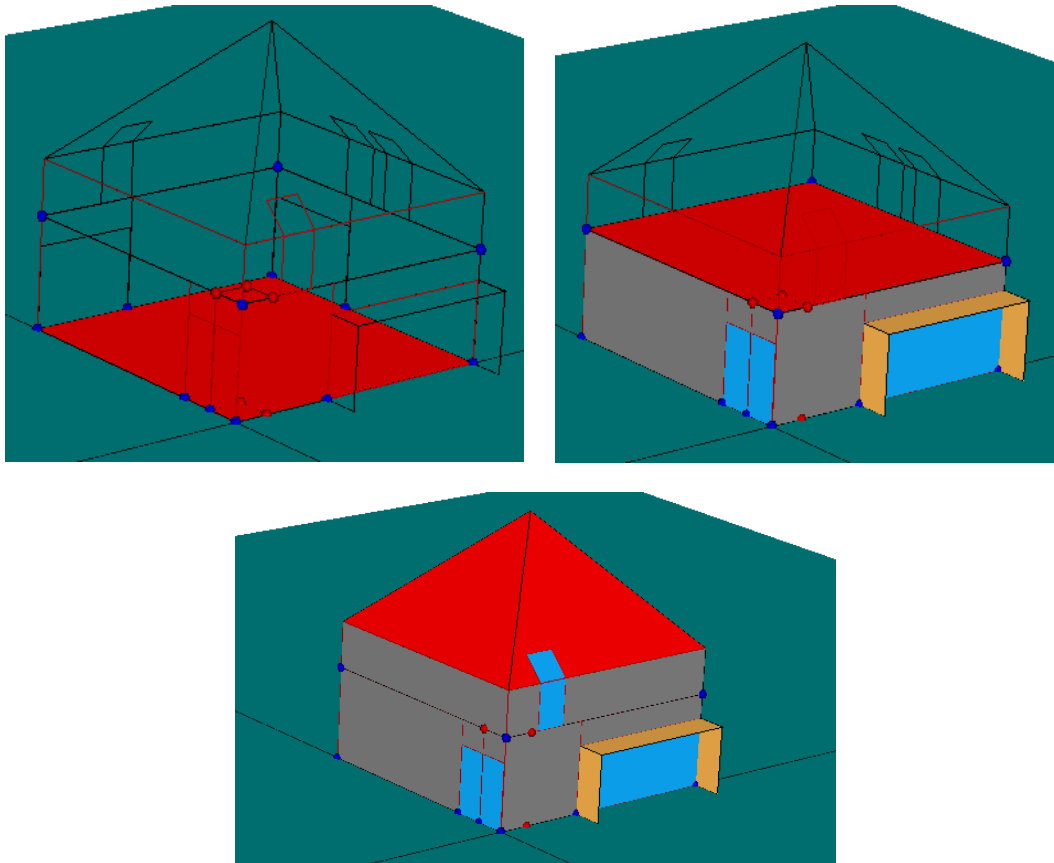


Figura 29. Vista de los cerramientos correspondientes al forjado de la cámara sanitaria (arriba izquierda), forjado interior (arriba derecha) y cubierta inclinada (abajo), en color rojo, para el caso B (edificio real).

3.4. Equipos de climatización.

En este apartado se comentarán los equipos de climatización instalados en los dos edificios. Estos equipos se emplean para la calefacción y refrigeración del edificio, la generación de Agua Caliente Sanitaria y la ventilación del edificio. En primer lugar, se presentarán los equipos empleados en el caso A (edificio simplificado), y después se pasará a los del caso B (edificio real).

3.4.1. Equipos de climatización del caso A (edificio simplificado).

Para este caso, se ha decidido mantener los valores por defecto de los equipos que se han generado, ya que el principal objetivo del Trabajo de Fin de Grado es estudiar las diferencias entre los forjados expuestos en el apartado 3.3.3., además de que no se disponía del tiempo necesario para realizar un análisis más exhaustivo de los equipos de climatización.

Para cubrir la demanda de calefacción y de Agua Caliente Sanitaria (ACS), se ha incluido un sistema mixto de calefacción y ACS, formado por una bomba de calor aire – agua. Este equipo toma calor del aire exterior y lo transfiere a un circuito de agua. Esta agua caliente se transfiere a las unidades terminales

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

(radiadores, suelos radiantes, fancoils, etc.) y se cede al ambiente interior del edificio a calefactar [AFEC]. Para ceder al ambiente el calor de este equipo se han incluido dos unidades terminales, situadas en el espacio central de la primera y la segunda planta, como se muestra en la figura 30.

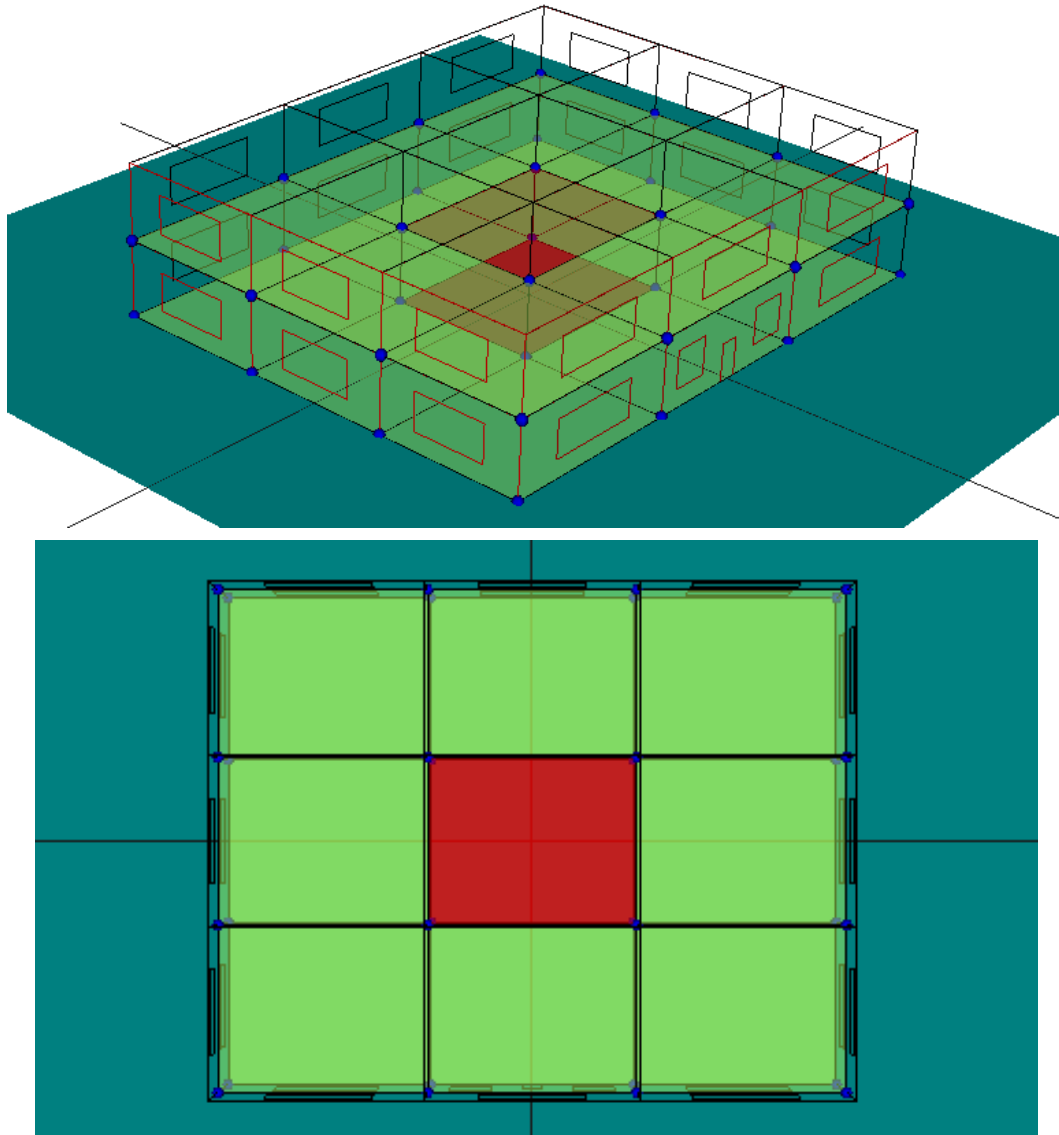


Figura 30. Vista de los espacios donde se sitúan las unidades terminales de calefacción, para la vista tridimensional (arriba) y en planta (abajo) del caso A (edificio simplificado).

La demanda de ACS a 60°C en litros/día para el edificio se ha calculado en base al anejo F del Documento Básico HE (DBHE) [MITMAb]. Este dice que el consumo diario por persona es de 28 l/día. Para calcular los litros totales es necesario calcular las personas residentes en el edificio. Según la tabla a del anejo F, para una vivienda de 2 dormitorios, que es la que se ha supuesto para el caso A, se establece un total de 3 residentes. Por tanto, en cada vivienda del

edificio se consumirán un total de $28 \frac{l}{\text{día persona}} \cdot 3 \frac{\text{personas}}{\text{vivienda}} = 84 \frac{l}{\text{día vivienda}}$.

Como en el edificio hay un total de 18 viviendas, el consumo del edificio será de $84 \times 18 = 1512$ l/día. Por último, según la tabla b del anejo F del DBHE, hay que tener en cuenta un factor de centralización en viviendas multifamiliares. Como existen 18 viviendas, este factor toma un valor de 0,90, por lo que la demanda final de ACS diaria del edificio será de $1512 \times 0,90 = 1361$ l/día.

La potencia establecida por el programa por defecto para este equipo es de 5,7 kW.

Para cubrir la demanda de refrigeración se ha empleado un sistema de climatización multizona con autónomos. Para esto se necesita una unidad exterior que emita al ambiente el calor extraído por los autónomos de dentro del edificio, los cuales se sitúan en los espacios centrales de la planta primera y segunda, es decir, los mismos espacios que se observan en la figura 21 para las unidades terminales de calefacción. La potencia establecida por el programa por defecto para este equipo es de 4 kW.

Por último, es necesario ventilar el edificio, cubriendo unas renovaciones de aire por hora establecidas según la tabla 2.1 del apartado 2 de la sección HS3 del Documento Básico HS (DBHS) [MITMA-c]. Esta tabla nos indica que, para un local seco habitable con dos dormitorios y sala de estar, el caudal mínimo de ventilación constante por vivienda debe ser de 8 (dormitorio principal) + 4 (dormitorio) + 8 (sala de estar) = 20 l/s, por lo que multiplicando por las viviendas del edificio se establece que es necesario un caudal total de 20 l/s \times 18 viviendas = 360 l/s. Para ello se ha incluido un ventilador en cada espacio correspondiente a una vivienda, los cuales, en conjunto, presentan las características mostradas en la figura 31.

Existe Ventilador en el sistema de ventilación

Datos Ficha ERP | Curva dada por puntos | Recuperador

Datos tomados de una curva característica

Caudal de cálculo [m3/h]

Potencia eléctrica consumida [W]

Núm	Caudal (m3/h)	Potencia (W)
1	900	432
2	1350	432
3	1800	432
4	2250	432
5	2700	432
6	0	0

Figura 31. Propiedades del conjunto de ventiladores que forman el sistema de ventilación para el caso A (edificio simplificado).

Para calcular las propiedades del equipo de ventilación, el programa requiere de la curva del ventilador, la cual se debe ir introduciendo por puntos, multiplicando el caudal y la potencia suministrada por un ventilador por el número de unidades instaladas en el edificio, que en este caso son 18, una por vivienda. Introduciendo estos datos, a partir de la curva del sistema, el programa realiza los cálculos correspondientes para el equipo de ventilación.

3.4.2. Equipos de climatización del caso B (edificio real).

En este caso, al tratarse de un edificio generado por el Código Técnico de la Edificación, son los propios autores quienes han realizado los cálculos pertinentes a la hora de diseñar los equipos de climatización [Rodríguez].

Al igual que en el caso A, para cubrir las demandas de calefacción y ACS se ha seleccionado un sistema mixto. Este equipo está formado por una caldera de biomasa, con una potencia de 25 kW y un rendimiento del 93%. Como unidades terminales que cedan el calor a la vivienda se han empleado suelos radiantes tanto en la planta baja como en la planta bajocubierta.

Para cubrir la demanda de ACS se introduce un acumulador de agua de 150l. Para obtener la demanda de ACS se ha realizado el cálculo correspondiente. Este cálculo se realiza, al igual que en el caso A, mediante el anejo F del DBHE. Se establece que esta vivienda consta de 3 dormitorios, por lo que según la tabla a el número de residentes es de 4. Como se trata de una vivienda unifamiliar, el factor de centralización establecido por la tabla b es de 1. Por tanto, suponiendo una demanda de 28 l/día para cada ocupante el total de la demanda para esta vivienda es de $28 \times 4 = 112$ l/día. Además, se han estimado unas pérdidas en el acumulador del 5%, las cuales son de $112 \times 0,05 = 5,6$ l/día. Con esto, la demanda obtenida es de 117,6 l/día.

En este caso, considerando las condiciones del entorno donde se realiza el proyecto, no se ha propuesto un sistema de refrigeración para cubrir esta demanda, ya que, al ser reducida, no se ha previsto necesario. Por tanto, el programa lo hará por defecto a la hora de realizar los cálculos.

Para el equipo de ventilación se ha empleado un sistema híbrido de ventilación natural para extraer el aire los locales húmedos y mecánica para introducir aire en los locales secos. Realizando el cálculo según la tabla 2.1 del DBHS, teniendo en cuenta que hay tres dormitorios, salón y sala de estar en la zona bajocubierta, se ha calculado un caudal de ventilación de 8 (dormitorio principal) + 4 (dormitorio) + 4 (dormitorio) + 10 (salón) + 10 (sala de estar) = 36 l/día. Para cumplir con estas especificaciones se ha introducido un sistema de ventilación con las características mostradas en la figura 32.

Existe Ventilador en el sistema de ventilación

Datos Ficha ErP | Curva dada por puntos | Recuperador

Datos dapor por la ficha ErP

Caudal de cálculo [m3/h]

Potencia eléctrica consumida [W]

Caudal máximo [m3/h]

Potencia eléctrica de entrada a caudal máximo [W]

Potencia de entrada específica [W/(m3/h)]

Caudal de referencia [m3/s]

Figura 32. Propiedades del sistema de ventilación para el caso B (edificio real).

4. Presentación e interpretación de Resultados del comportamiento energético del edificio.

Una vez realizados los cálculos mediante el uso de la Herramienta Unificada Líder Calener (HULC) se muestra, en este apartado, un análisis de los resultados obtenidos mediante el programa para los 3 tipos de forjado estudiados (hormigón, cerámico y EPS), tanto con la placa de aislamiento como sin ella. En el anexo B se muestran las capturas del programa HULC, del cual se han extraído los datos mostrados en este apartado.

Esta herramienta muestra tres parámetros principales, relacionados con el comportamiento energético del edificio. Estos son el consumo de energía primaria (EP) del mismo, la demanda energética y, por último, las emisiones de CO₂. Las unidades para los consumos de energía primaria y las demandas energéticas son kWh/m² año; y las de las emisiones de CO₂ son kgCO₂/m² año.

Además de estos datos, HULC muestra una catalogación energética del edificio en base a los parámetros anteriores, calificándolo mediante una letra, la cual varía entre A y G, siendo A la que muestra un mejor comportamiento energético y G la peor [IDAE-b].

En los siguientes apartados se irán analizando los resultados de los dos casos de estudio, presentados en el apartado 3.2, analizando las diferencias entre los forjados para el caso A (simplificado) y utilizando el caso B (real) para comprobar si las tendencias mostradas en el caso A son similares también para una vivienda completa.

Se han empleado una serie de ecuaciones para calcular los porcentajes y las variaciones que se muestran en las tablas de los siguientes apartados (ecuaciones 5, 6 y 7). Para calcular los porcentajes que suponen los consumos de EP, demandas energéticas y emisiones de CO₂ sobre el total se ha utilizado la ec. 5

$$\text{Contribución del equipo (\%)} = \frac{\text{valor absoluto del equipo}}{\text{total}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Para calcular las variaciones de los forjados de hormigón y cerámico respecto a los de EPS se ha empleado la ec. 6. Esta ecuación se emplea tanto para el consumo de EP como para el de la demanda energética y las emisiones de CO₂

$$\text{Variación (\%)} = \frac{\text{forjado hormigón o cerámico} - \text{forjado de EPS}}{\text{forjado de EPS}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 6}$$

El cálculo de la variación entre los forjados con placa y los respectivos forjados sin ella se realiza mediante la ec. 7. Al igual que las ecuaciones anteriores, esta se utiliza para los consumos de EP, las demandas energéticas y las emisiones de CO₂.

$$\text{Variación (\%)} = \frac{\text{forjado con placa} - \text{forjado sin placa}}{\text{forjado sin placa}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 7}$$

Además, se ha calculado la relación entre las emisiones de CO₂ y la energía primaria consumida por los distintos equipos de climatización, la cual se indica en kgCO₂/kWhEP. Esta relación indica la eficiencia de estos equipos, ya que valores bajos de esta relación significan que el equipo emite pequeñas cantidades de CO₂ a la atmósfera por cada kWh de energía primaria que consume, mientras que valores más elevados muestran que el equipo es menos eficiente energéticamente, emitiendo mayores cantidades de CO₂ por cada kWh de energía primaria que consume. Esta relación se calcula a partir de la Ec. 8.

$$\text{Relación entre emisiones y consumo de EP} = \frac{\text{emisiones CO}_2}{\text{consumo EP}} \quad \text{Ec. 8}$$

4.1. Forjados sin placa.

En este apartado se analizarán los resultados estimados por el programa HULC para los forjados sin placa. Se analizarán primero los consumos de EP, demandas energéticas y emisiones de CO₂ totales. Después, se realizará un desglose para ver la influencia de cada uno de los equipos de climatización.

4.1.1. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ totales.

En este apartado se muestran los datos totales estimados por el programa. Para ello se ha generado la tabla 4 en la que se muestran los siguientes parámetros para el caso A:

- Valores absolutos del consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ totales.
- Valores comparativos de los consumos de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ totales de los forjados de hormigón y cerámico respecto al forjado de EPS, calculados mediante la Ec. 6 y expresados en %.

Junto con la tabla se incluirán las representaciones gráficas que permitirán una mejor visualización de las diferencias entre los distintos tipos de forjados y de sus tendencias.

Valores absolutos			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	121,1	120,7	108,9
Demanda energética (kWh/m ² año)	89,7	89,1	80,7
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	20,1	19,9	17,7
Comparativa entre los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS (%)			
	Hormigón	Cerámico	
Consumo de EP	+11,2	+10,4	
Demanda energética	+11,3	+10,5	
Emisiones de CO ₂	+13,9	+13,0	

Tabla 4. Valores absolutos y comparativos de los resultados totales correspondientes a los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).

En la figura 33 se muestran los valores absolutos de consumos de EP, demandas energéticas y emisiones de CO₂ indicados en la tabla 4.

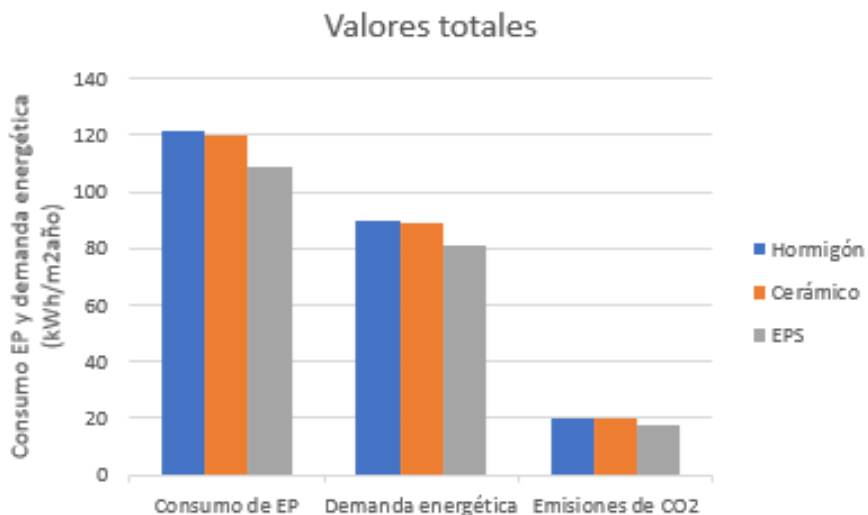


Figura 33. Valores totales de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).

En la figura 33 se observa la mejoría obtenida, que es reducir el consumo, al introducir el forjado de EPS respecto a los otros dos tipos, Sin embargo, las diferencias entre los forjados de hormigón y cerámico son reducidas.

Observando los valores comparativos entre los forjados se aprecian mejoras en todos los aspectos, es decir, menor consumo energético y menores emisiones de CO₂, al introducir el forjado de EPS respecto al de hormigón y al cerámico. Los consumos de EP y la demanda energética son un 11,2 y un 10,4% mayores para el forjado de hormigón que para el de EPS, que como se comentó anteriormente, se toma como referencia. Para el forjado cerámico son un 11,3 y un 10,5% mayores. En cuanto a las emisiones de CO₂, las del forjado de hormigón son un 13,9% superiores respecto a las del de EPS, mientras que las del cerámico son un 13,0% mayores (tabla 4).

Con estos resultados se observa que el introducir un forjado de EPS genera mejoras de alrededor de 11 kWh/m² año para los consumos de EP, de 9kWh/m² año para la demanda energética y de entre 2 y 3 kgCO₂/m² año para las emisiones (tabla 4).

A continuación, se reflejan los resultados obtenidos para el caso B con los mismos forjados que en el caso A, pero esta vez para una vivienda real. Estos resultados se recogen en la tabla 5.

Valores absolutos			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	80,2	72,6	69,4
Demanda energética (kWh/m ² año)	68,0	60,9	58,0
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	2,6	2,0	1,9
Comparativa entre los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS total (%)			
	Hormigón	Cerámico	
Consumo de EP	+15,6	+4,6	
Demanda energética	+17,2	+5,0	
Emisiones de CO ₂	+36,8	+5,3	

Tabla 5. Valores absolutos y comparativos de los resultados totales correspondientes a los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).

Para mejorar la visualización comparativa entre los forjados para este caso, se incluye a continuación la figura 34, con todos los valores de la tabla 5.

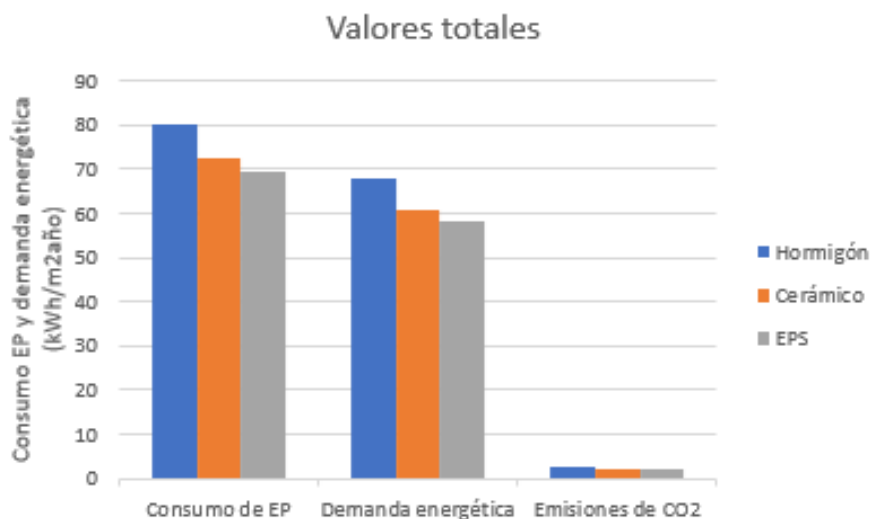


Figura 34. Valores totales de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio completo).

Si se hace la comparativa entre los casos A y B, en la figura 34 queda reflejada la mayor eficiencia energética de esta vivienda (edificio completo) frente a lo mostrado en el caso anterior (caso A, edificio simplificado), puesto que los valores de las emisiones de CO₂ presentan un gran decrecimiento, de más de 15 kgCO₂/m²año, respecto al caso A. Además, las columnas correspondientes a los forjados cerámico (naranja) y de EPS (gris) están más próximas, reflejando ese mayor acercamiento entre los resultados de estos dos forjados mencionado anteriormente. Sin embargo, el forjado de hormigón sigue presentando diferencias del mismo orden respecto al de EPS que en el caso A.

Por otro lado, si se analiza la comparativa entre el forjado EPS y los otros dos tipos, se muestra de nuevo con claridad como el forjado EPS es el que menor consumo energético supone, con un comportamiento ligeramente superior al cerámico (parámetros del forjado cerámico entre un 4,6 y un 5,3% mayores), y claramente superior al de hormigón (parámetros entre un 15,6 y un 36,8% superiores para el forjado de hormigón).

Si vamos al detalle, analizando los valores de la tabla 5, vemos que las diferencias encontradas para los resultados totales de consumo y demanda entre el forjado de hormigón y el de EPS son iguales en los casos A y B. En cuanto a los valores absolutos no difieren, aunque las diferencias porcentuales sean ligeramente superiores para el caso B (entre un 4 y un 6% mayores). En el caso de las emisiones, al tratarse el caso B de un edificio con un mejor comportamiento energético, los valores de estas son entre 7 y 9 veces inferiores a las del caso A, por lo que las diferencias numéricas entre los distintos forjados son más reducidas. Mientras que en el caso A las diferencias entre el forjado de hormigón y el de EPS eran de 2,4 kgCO₂/m²año y entre el cerámico y el de EPS de 2,2 kgCO₂/m²año (tabla 4), en el caso B son de 0,7 y 0,1 kgCO₂/m²año respectivamente (tabla 5). Sin embargo, al ser las emisiones menores en el caso B, las diferencias porcentuales entre los forjados se acentúan. Esto se observa con claridad en el caso del forjado de hormigón, aunque en el caso B la diferencia numérica es menor, la diferencia porcentual respecto a las emisiones del forjado de EPS es de un 36,8%.

Donde sí que se observa una mayor diferencia es entre los resultados obtenidos para el forjado cerámico y el de EPS. En este caso. Los resultados del forjado cerámico se acercan más al de EPS, siendo las diferencias de entre un 4,6 y un 5,3% (tabla 5). En el caso A las diferencias eran mayores, de entre un 10,4 y un 13,0% (tabla 4).

A continuación, como se comentó en el apartado 4.1, el consumo energético total se puede desglosar en consumo del equipo de calefacción, del equipo de refrigeración, del equipo del Agua Caliente de Servicio ACS y del equipo de ventilación. Para analizar y observar la causa que provoca las diferencias de

los resultados totales mostrados anteriormente, en los siguientes apartados, se mostrarán los resultados desglosados para los equipos de calefacción, refrigeración, ACS y ventilación.

4.1.2. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ en calefacción.

En este apartado se muestran los resultados estimados por el programa para los consumos de Energía Primaria (EP), demanda energética y emisiones de CO₂ asociados al equipo de calefacción. Para ello, se ha generado la tabla 6 con los siguientes parámetros, para el caso A:

- Valores absolutos del consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ del equipo de calefacción.
- Contribución sobre el total del consumo de EP, demanda energética y emisiones del equipo de calefacción, calculado mediante la Ec. 5 y expresado en %.
- Valores comparativos de los resultados con forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS, calculados mediante la Ec. 6 y expresados en %.

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

Valores equipo de calefacción			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	74,7	73,8	61,7
Demanda energética (kWh/m ² año)	58,0	57,3	48,0
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	15,2	15,1	12,7
Contribución del equipo de calefacción sobre el total (%)			
	Forjado hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP	61,7	61,4	56,6
Demanda energética	64,6	64,3	59,5
Emisiones de CO ₂	75,8	75,5	71,7
Comparativa de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS calefacción (%)			
	Hormigón	Cerámico	
Consumo de EP	+21,1	+19,7	
Demanda energética	+20,8	+19,3	
Emisiones de CO ₂	+20,4	+19,0	

Tabla 6. Valores absolutos y comparativos para el equipo de calefacción de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).

Para mejorar la visualización de estos datos, se han incluido las figuras 35 y 36. Primero se analiza la contribución sobre el total del equipo de calefacción (figura 35).

Para calcular la contribución de este equipo de calefacción sobre el total se ha realizado la media entre los tres forjados analizados, con el objetivo de condensar la figura 35 y facilitar su comprensión. Para ello se ha sumado la contribución sobre el total del forjado hormigón (FH), del forjado cerámico (FC) y del forjado de EPS (FEPS); y se ha dividido entre 3 según la Ec. 9. Este cálculo se ha realizado para los tres parámetros de estudio.

$$\text{Contribución media equipo de calefacción} = \frac{FH + FC + FEPS}{3} \quad \text{Ec. 9}$$

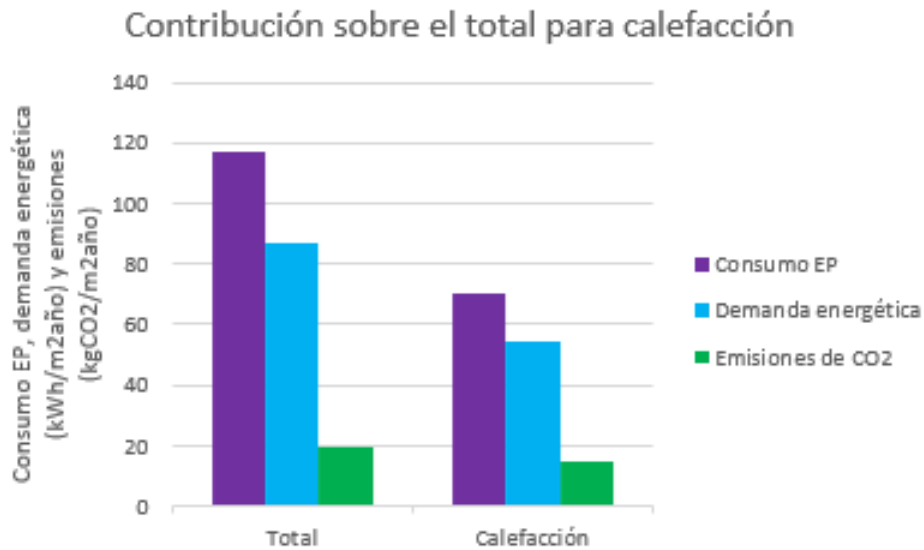


Figura 35. Contribución del equipo de calefacción sobre el total para los principales parámetros relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).

Como se presenta en la figura 35, los valores para los consumos, demandas y emisiones del equipo de calefacción suponen más de la mitad del total, al igual que se refleja de forma numérica en la tabla 6.

Analizando con más detalle, a partir de los resultados de la tabla 6, se puede ver que el equipo destinado a calefactar el edificio en invierno es el que tiene unos mayores valores. Estos suponen entre un 56 y un 62% del total para los consumos de EP y entre un 59 y un 65% para la demanda energética (tabla 6). En cuanto a las emisiones de CO₂ este equipo supone tres cuartas partes de las emisiones totales. Esto se debe a que nos encontramos en una zona climática D2 [MITMA-b], lo que quiere decir que el clima durante los meses de invierno es de los más severos de la península, lo que requerirá un mayor consumo de energía en calefacción.

Después se analiza la influencia de los tipos de forjado (figura 36), donde se muestra la variación de comportamiento entre los diferentes forjados.

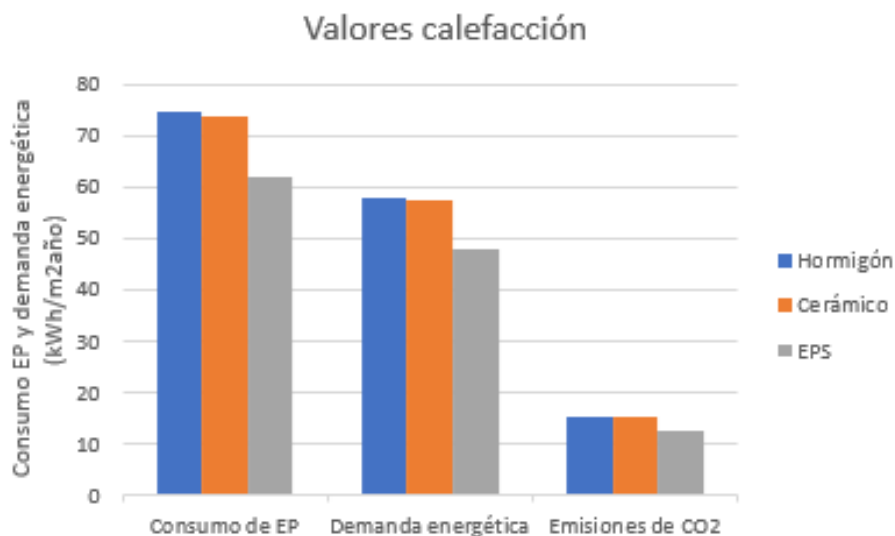


Figura 36. Valores del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).

En la figura 36 se muestra como el forjado de EPS produce mejoras respecto a los otros dos, ya que tanto sus consumos de EP, como la demanda energética y las emisiones de CO₂ son más bajas. Las diferencias entre los forjados de hormigón y cerámico son reducidas, del orden de 0,9 y 0,7 kWh/m²año para el consumo de EP y la demanda energética y de 0,1 kgCO₂/m²año para las emisiones (tabla 6).

En cuanto a la influencia de los forjados, el forjado de EPS, con una mayor capacidad de aislamiento térmico, produce mejores resultados en los tres parámetros calculados. El forjado de hormigón genera unos valores de consumo energético entre un 20 y un 21% superiores, y el cerámico un 19% superiores (tabla 6). El signo positivo nos indica que los forjados de hormigón y cerámico presentan unos consumos, demandas y emisiones superiores, es decir, son menos eficientes energéticamente.

Para calcular la eficiencia de este equipo, se ha calculado la relación entre el consumo de EP y las emisiones a partir de la Ec.8. Se ha obtenido una relación de 0,204 kgCO₂/kWh de EP. Este valor es el más elevado de los equipos calculados, por lo que el equipo de calefacción del caso A es el menos eficiente energéticamente. Esto justifica que las emisiones de CO₂ de calefacción supongan tres cuartas partes de las totales, sumado a que este es el equipo que mayor cantidad de tiempo permanece activo a lo largo del año.

Ahora se van a analizar los resultados para el edificio real. En la tabla 7 se muestran los resultados calculados para el consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ para el caso B, la contribución de los equipos sobre el total y las comparaciones entre los tres tipos de forjado analizados.

Valores equipo de calefacción			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	43,9	39,7	37,4
Demanda energética (kWh/m ² año)	36,6	33,0	31,2
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	0,8	0,7	0,6
Contribución del equipo de calefacción sobre el total (%)			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	54,7	54,6	53,8
Demanda energética (kWh/m ² año)	53,8	54,3	53,7
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	29,2	33,3	34,1
Comparativa de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS calefacción (%)			
	Hormigón	Cerámico	
Consumo de EP	+17,4	+6,1	
Demanda energética	+17,3	+5,8	
Emisiones de CO ₂	+33,3	+16,7	

Tabla 7. Valores absolutos y comparativos para el equipo de calefacción de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).

A continuación, se muestra la figura 37, en la que aparecen los valores que indican la contribución de este equipo sobre el total de los tres parámetros de cálculo, expuestos de forma numérica en la tabla 7.

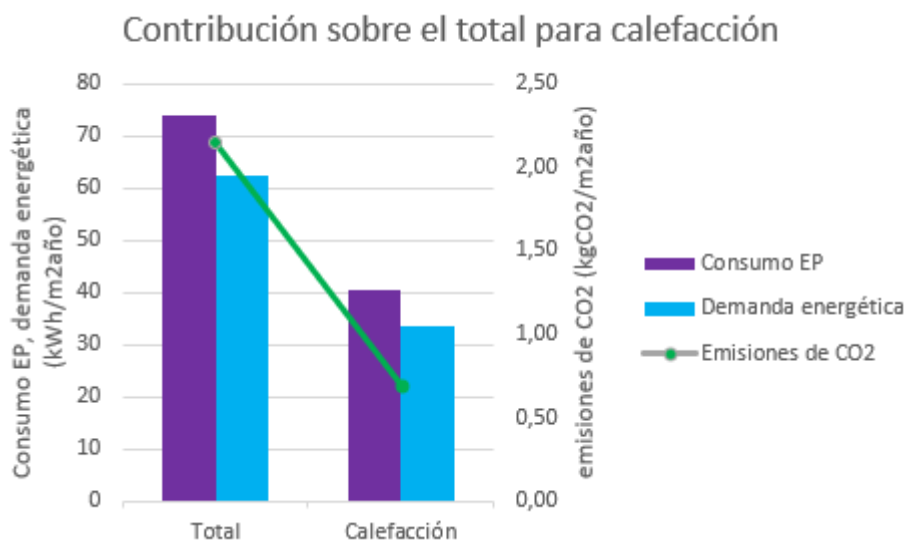


Figura 37. Contribución del equipo de calefacción sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).

Observando la figura 37 se aprecia que el consumo de energía primaria y la demanda energética de este equipo suponen la mitad de las totales. El consumo de energía primaria supone entre un 53 y un 55% del total, al igual que la demanda energética (tabla 7). Esto supone una diferencia de entre 7 y 3 unidades en el porcentaje respecto a los mismos resultados obtenidos para el caso A para el consumo de EP, y de entre 9 y 6 unidades en la demanda energética.

La diferencia más significativa se encuentra a la hora de analizar las emisiones de CO₂. Mientras que en el caso A suponían entre un 71 y un 76% (tabla 6), en este caso suponen entre un 29% y un 34% (tabla 7). Esto significa que la contribución del equipo de calefacción se ha reducido a más de la mitad respecto al caso A. La explicación de este cambio se encuentra al calcular la relación entre las emisiones y la EP consumida, calculada a partir de la Ec.8. El valor obtenido para este equipo es de 0,018 kgCO₂/kWhEP, el cual es 11 veces menor que el del equipo de calefacción del caso A (0,204 kgCO₂/kWhEP). Al ser menor esta relación, las emisiones de este equipo serán menores, lo cual explica una menor contribución de las mismas sobre el total.

En la figura 38 se reflejan de forma gráfica las diferencias entre los tres forjados analizados para el consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂, cuyos valores numéricos se encuentran en la tabla 7.

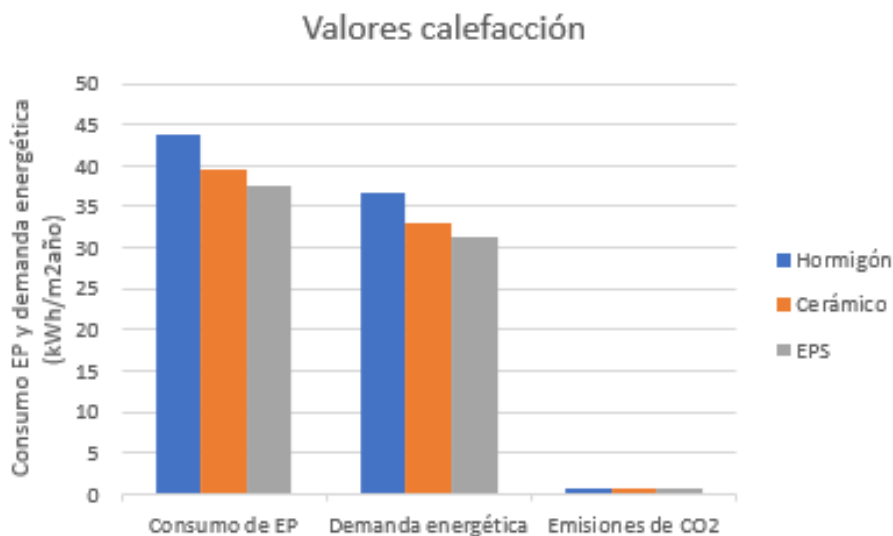


Figura 38. Valores del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).

En la figura 38 se observa nuevamente un mayor acercamiento entre los valores obtenidos para el forjado cerámico y de EPS, donde las diferencias son de 2,3 y 1,8 kWh/m²año para el consumo y la demanda respectivamente (tabla 7), en comparación a los mostrados en la figura 36, correspondiente al caso A, donde los que tenían valores semejantes eran el de hormigón y el cerámico, con diferencias entre sí de 0,9 y 0,7 kWh/m²año para consumo y demanda. Además, las diferencias entre los tres forjados son menores que las de la figura 36, donde existe mayor variación entre los valores correspondientes a los forjados de hormigón y cerámico respecto a la del forjado de EPS.

En el caso B, ambos forjados presentan menores diferencias respecto al forjado de EPS que en el caso A. Mientras que el forjado de hormigón presentaba valores de 13 y 10 kWh/m²año más que el forjado de EPS para el consumo de EP y la demanda energética respectivamente (tabla 6), en el caso B las diferencias son de 6,5 y 5,4 kWh/m²año (tabla 7). El forjado cerámico, que antes presentaba variaciones de 12,1 y 9,3 kWh/m²año (tabla 6) respecto al forjado de EPS, ahora las tiene de 2,3 y 1,8 kWh/m²año (tabla 7) respectivamente. Es decir, las diferencias numéricas con el forjado de EPS se han reducido a la mitad para el forjado de hormigón y 5 veces para el cerámico entre el caso A y el B.

Porcentualmente el forjado de hormigón presentaba diferencias de un 20% respecto al de EPS para el caso A (tabla 6), las cuales ahora se han visto

reducidas a un 17% (tabla 7). En cuanto al cerámico, las diferencias con el caso A son mayores, de un 19% para el caso A (tabla 6) y un 6% para el caso B.

Las diferencias en las emisiones de CO₂ en calefacción entre los tres forjados del caso B, aunque porcentualmente son de un 33,3% entre el forjado de hormigón y el de EPS y de un 16,7% entre el cerámico y el de EPS, numéricamente son reducidas, de 0,2 kgCO₂/m²año entre el hormigón y el EPS y de 0,1kgCO₂/m²año entre el cerámico y el EPS (tabla 7). Estos valores para las emisiones se deben, como se ha mencionado con anterioridad, al mejor comportamiento energético del edificio B y la mayor eficiencia térmica del equipo de calefacción empleado en este edificio.

4.1.3. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ en refrigeración.

En este apartado se exponen los resultados del consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ correspondientes al equipo de refrigeración. Estos quedan reflejados en la tabla 8, la cual muestra, para el caso A:

- Valores numéricos del consumo de EP, demanda energética y emisiones del equipo de refrigeración.
- Contribución de este equipo sobre el total de estos tres parámetros estimados en %, calculados a partir de la Ec. 5.
- Valores comparativos entre los forjados de hormigón y cerámico respecto al forjado de EPS, en %, calculados con la Ec. 6.

Valores equipo de refrigeración			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	11,7	11,7	12,5
Demanda energética (kWh/m ² año)	12,4	12,4	13,3
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	1,6	1,6	1,8
Contribución del equipo de refrigeración sobre el total (%)			
	Forjado hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP	9,6	9,8	11,5
Demanda energética	13,8	14,0	16,5
Emisiones de CO ₂	8,1	8,2	9,9
Comparativa de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS refrigeración (%)			
	Hormigón	Cerámico	
Consumo de EP	-6,8	-6,3	
Demanda energética	-6,7	-6,3	
Emisiones de CO ₂	-6,9	-6,3	

Tabla 8. Valores absolutos y comparativos para el equipo de refrigeración de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A).

Para mejorar la visualización de los datos reflejados en la tabla 8 se han generado la figura 39, donde se muestra la contribución del equipo de refrigeración sobre el total del consumo, demanda y emisiones; y la figura 40, donde aparecen las diferencias entre los forjados para el consumo de EP, demanda y emisiones en refrigeración. En primer lugar, se analizará la figura 39.

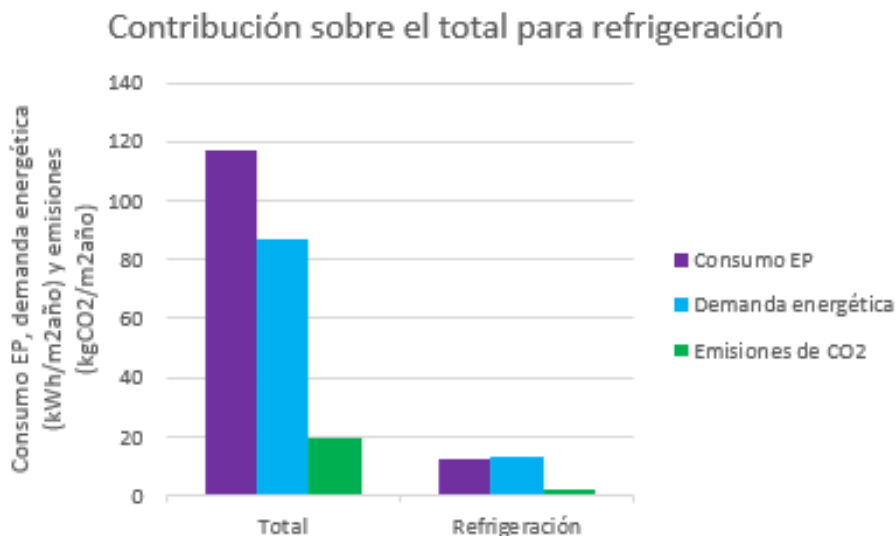


Figura 39. Contribución del equipo de refrigeración sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).

En la figura 39 se aprecia una menor contribución del equipo de refrigeración sobre el total respecto al de calefacción para todos los parámetros, como se ha visto en la tabla 8. Para realizar esta gráfica nuevamente se ha realizado una media entre los forjados empleando la Ec. 9

El consumo destinado a la refrigeración del edificio en los meses de verano supone entre un 9 y un 12% del consumo de EP total para los forjados sin placa. Para las emisiones de CO₂ entre un 8 y un 10%. Para la demanda energética la contribución del equipo de refrigeración aumenta, llegando a suponer entre un 13 y un 17% del total (tabla 8).

En este caso, al tratarse de una zona climática D2, el clima en verano no es tan severo, por lo que se requiere de una menor cantidad de energía para climatizar el edificio en estos meses. Además, el número de meses fríos en Valladolid es mayor que el de meses con altas temperaturas, por lo que el sistema de refrigeración trabaja durante menos tiempo.

En cuanto a la relación entre las emisiones y el consumo de EP, calculada por la Ec. 8, la del equipo de refrigeración es de 0,139 kgCO₂/kWhEP, inferior a la del equipo de calefacción. Este también provoca que la contribución de este equipo en las emisiones de CO₂ sea menor que la del equipo de calefacción.

A continuación, se expone la figura 40, donde aparecen las diferencias entre los tres forjados estudiados.

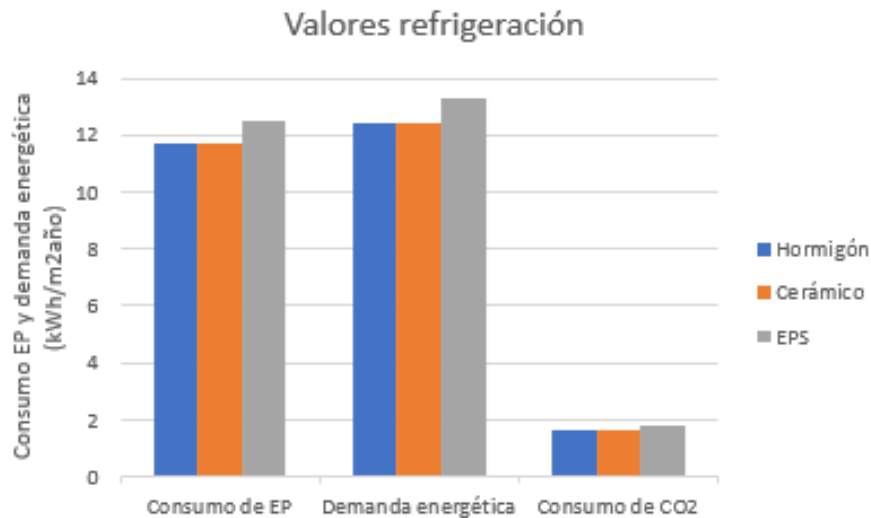


Figura 40. Valores del equipo de refrigeración para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).

En este caso, al contrario que con el sistema de calefacción, los consumos más elevados se obtienen para el forjado de EPS, mientras que los menores se obtienen para el de hormigón. El forjado de hormigón reduce el consumo del de EPS en valores entre un 6,7 y un 6,9%, mientras que el cerámico lo hace en un 6,3% (tabla 8). El signo negativo indica que los forjados de hormigón y cerámico disminuyen los parámetros que aporta el forjado de EPS.

Analizando la figura 40, los resultados permanecen estables al variar los forjados, ya que las tres columnas alcanzan valores similares, siendo las diferencias entre el forjado con mayores valores en consumo, demanda y emisiones (EPS) y el forjado con menores valores (hormigón) inferiores a la unidad (tabla 8). Únicamente el forjado de EPS alcanza valores ligeramente superiores, de 0,8 y 0,9 kWh/m²año más para el consumo y la demanda, y de 0,2 kgCO₂/m²año más para las emisiones (tabla 8).

La tabla siguiente (tabla 9) muestra los resultados obtenidos para el consumo de EP, demanda energética y emisiones del equipo de refrigeración para el caso B. También se incluyen la contribución de este equipo sobre el total de los tres parámetros y los porcentajes comparativos de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS.

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

Valores equipo de refrigeración			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	8,8	5,5	4,5
Demanda energética (kWh/m ² año)	9,4	5,9	4,8
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	1,2	0,8	0,6
Contribución del equipo de refrigeración sobre el total (%)			
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	11,0	7,6	6,5
Demanda energética (kWh/m ² año)	13,8	9,6	8,3
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	47,9	37,7	34,1
Comparativa de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS refrigeración (%)			
	Hormigón	Cerámico	
Consumo de EP	+95,5	+22,2	
Demanda energética	+95,8	+22,9	
Emisiones de CO ₂	+100,0	+33,3	

Tabla 9. Valores absolutos y comparativos para el equipo de refrigeración (caso B, edificio real).

Para poder analizar de forma visual los resultados mostrados en la tabla 9 se incluyen la figura 41, que muestra la contribución de este equipo sobre el total para los tres parámetros de estudio; y la figura 42, donde se comparan los resultados en refrigeración entre los tres forjados. Para condensar la gráfica de la figura 41 se ha realizado la media entre los forjados a partir de la Ec. 8. En primer lugar, se analizará la figura 41.

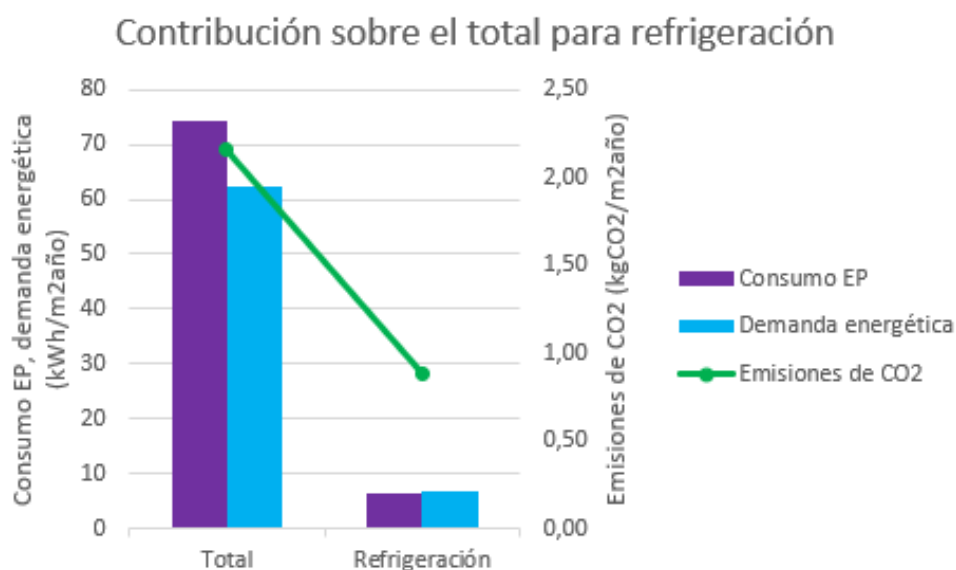


Figura 41. Contribución del equipo de refrigeración sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).

En el caso B no se observan diferencias notables en la contribución sobre el total del consumo de EP y la demanda energética respecto al caso A. En el caso A la contribución de este equipo para el consumo de EP se situaba entre el 9 y el 12% (tabla 6), mientras que en el caso B lo hace entre el 6 y el 11% (tabla 9). Para la demanda energética, en el caso A la contribución sobre el total del equipo de refrigeración era de entre un 13 y un 17% (tabla 8), y en el caso B es de entre un 8 y un 14% (tabla 9).

Sin embargo, sí que se aprecian diferencias entre los dos casos en cuanto a las emisiones de CO₂. En el caso A, la contribución en las emisiones era de entre un 8 y un 10% (tabla 8). En el caso B, esta asciende y se sitúa entre un 34 y un 48% (tabla 9). Si calculamos la relación entre el consumo de EP y las emisiones de CO₂ para el caso B mediante la Ec. 8, obtenemos un valor de 0,136 kgCO₂/kWhEP, el cual no difiere del obtenido para este equipo en el caso A. No obstante, al tener el equipo de calefacción del edificio real una mayor eficiencia que el del edificio simplificado, su contribución sobre el total disminuye, aumentando la del equipo de refrigeración, cuya eficiencia respecto al caso A no ha variado. Esto confirma la gran eficiencia del equipo de calefacción del caso B, que con valores de consumos de energía entre 5 y 8 veces superiores en calefacción que en refrigeración las emisiones de CO₂ son inferiores.

La otra diferencia observada si analizamos las tablas 8 y 9 es que en el caso A era el forjado de EPS el que tenía unos mayores valores de consumo, demanda y emisiones, por lo que era el que mayor contribución tenía sobre el total para la refrigeración entre los tres forjados. En el caso B es el forjado de hormigón

para el que se obtienen unos valores mayores para los parámetros de estudio, por lo que es el que mayor contribución tiene sobre el total entre los tres forjados en el apartado de refrigeración.

A continuación, se analizarán las diferencias entre los forjados de hormigón, cerámico y de EPS, representadas de forma gráfica en la figura 42.

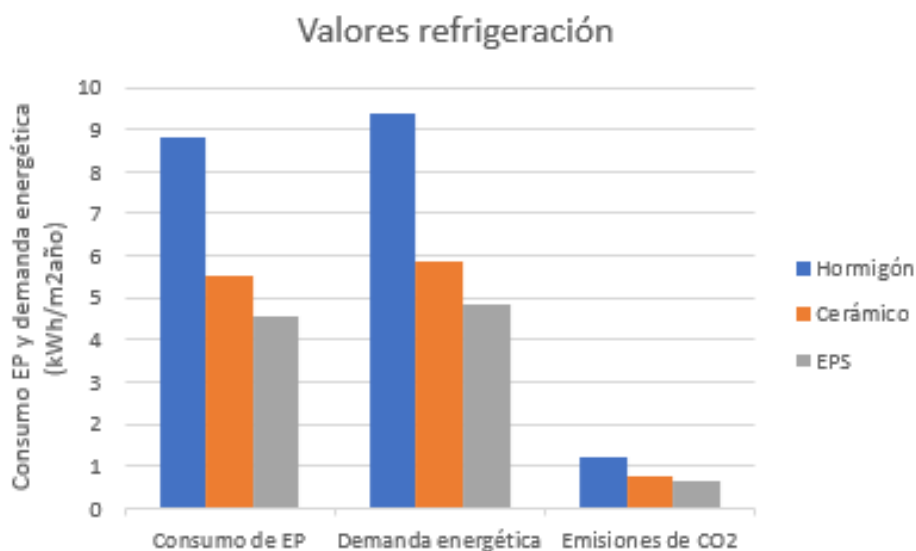


Figura 42. Valores del equipo de refrigeración para los principales parámetros relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso B, edificio real).

En la figura 42 se reflejan los valores mayores en todos los parámetros para el forjado de hormigón respecto a los otros dos forjados, como se apreciaba de forma numérica en la tabla 9, con consumos, demandas y emisiones hasta un 100% superiores en el hormigón frente al EPS.

Como se ha mencionado anteriormente, la gran diferencia respecto al caso A es que en el primer caso es el forjado de EPS el que tiene un mayor consumo de EP, demanda energética y cantidad de emisiones de CO₂ (figura 40). Sin embargo, en el caso B, el forjado de EPS es el que alcanza unos menores valores de refrigeración, siendo la mitad de los del forjado de hormigón y entre un 20 y un 30% menores que lo del cerámico (tabla 9).

Numéricamente las diferencias en el caso B son menos significativas, ya que los valores energéticos del equipo de refrigeración son reducidos. Las diferencias entre el forjado de hormigón y el de EPS son de 4,3kWh/m²año para el consumo de EP y de 4,6kWh/m²año para la demanda energética (tabla 9). Las diferencias entre el forjado de EPS y el cerámico son de 1kWh/m²año para el consumo de EP y de 1,1kWh/m²año para la demanda energética (tabla 9).

También se puede observar una mayor cantidad de emisiones de CO₂ en refrigeración que en calefacción, sobre todo en el caso del forjado de hormigón, las cuales superan la unidad, cosa que no ocurría en las emisiones de calefacción.

4.1.4. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ para ACS y ventilación.

En este apartado se exponen los resultados de los equipos destinados a la generación de Agua Caliente Sanitaria (ACS) y ventilación para los forjados sin placa. Para ello se recurre a la tabla 10, donde aparecen los siguientes datos para el caso A:

- Valores absolutos del consumo de EP. Demanda energética y emisiones de CO₂ para los dos equipos estudiados.
- Contribución sobre el total de cada uno de los dos equipos para los tres parámetros mencionados en el anterior punto en %, calculados mediante la Ec. 5.

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

Valores equipos de ACS y ventilación						
	Equipo de ACS			Equipo de ventilación		
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	28,5	28,5	28,5	6,2	6,2	6,2
Demanda energética (kWh/m ² año)	19,4	19,4	19,4	-	-	-
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	2,4	2,4	2,4	0,9	0,9	0,9
Contribución de los equipos de generación de ACS y ventilación sobre el total						
	Equipo de ACS			Equipo de ventilación		
	Forjado hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS	Forjado hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP	23,6	23,7	26,2	5,1	5,1	5,7
Demanda energética	21,6	21,7	24,0	-	-	-
Emisiones de CO ₂	11,8	11,9	13,4	4,3	4,4	5,0

Tabla 10. Valores absolutos y contribución sobre el total de los equipos de generación de ACS y ventilación para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados sin placa (caso A, edificio simplificado).

Para una mejor visualización de la contribución sobre el total de estos dos equipos se han generado dos gráficas, una para el equipo de ACS (figura 43) y otra para el de ventilación (figura 44). Primero se analizará la correspondiente al equipo de ACS.

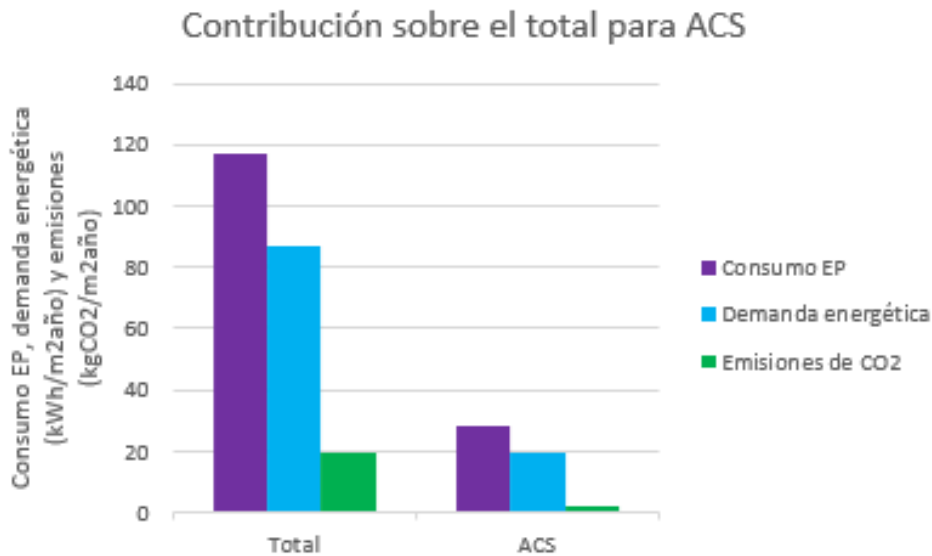


Figura 43. Contribución del equipo de ACS sobre el total para los principales parámetros relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).

En la figura 43 queda reflejado que el equipo destinado a producir Agua Caliente Sanitaria es el que alcanza un valor más elevado para todos los parámetros después del equipo de calefacción, superando al de refrigeración y ventilación.

El consumo de EP destinado a producir agua caliente sanitaria supone entre un 23 y un 27% del total para el consumo de EP, entre un 21 y un 24% para la demanda energética y entre un 11 y un 14% para las emisiones (tabla 10). Es el segundo sistema que más consume, solo superado por el de calefacción. Debido a que el agua de red en Valladolid se suministra a una temperatura de alrededor de 7 °C en invierno y es necesario calentarla a 60 °C [MITMAb], se requiere una gran cantidad de energía para calentar el agua del edificio en estos meses fríos.

La contribución de este equipo sobre las emisiones de CO₂ totales disminuye respecto a los otros dos parámetros. Esto se debe a que la relación entre el consumo de EP y las emisiones de este equipo, calculada mediante la Ec. 8, es de 0,083 kgCO₂/kWhEP. Esto significa que este equipo genera menores cantidades de CO₂ por cada kWh de EP consumida que el resto de equipos. Tiene una relación emisiones-consumo 2,5 veces inferior a la del equipo de calefacción y 1,7 veces inferior a la del de refrigeración y a la del de ventilación.

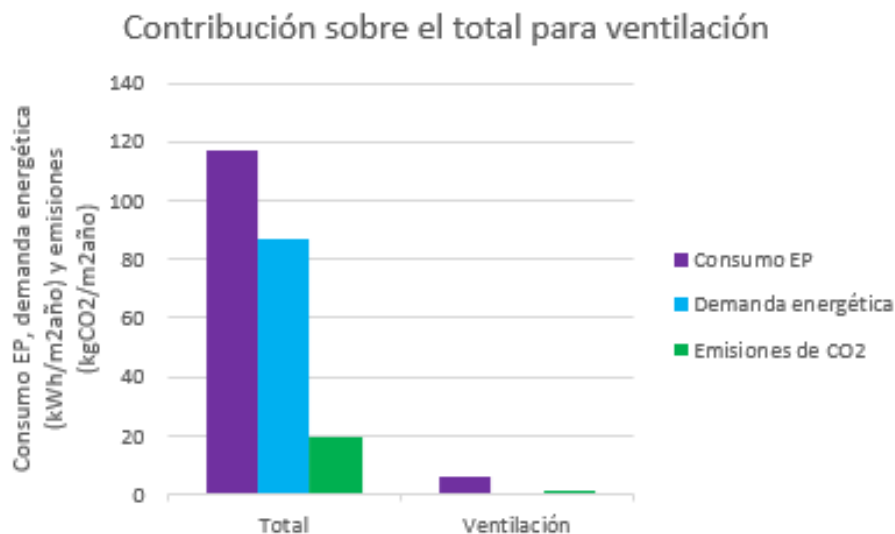


Figura 44. Contribución del equipo de ventilación sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).

En cuanto al equipo de ventilación (figura 44), es el que tiene unos valores más pequeños. Este supone entre un 5 y un 6% del consumo de EP total y entre un 4 y un 5% de las emisiones de CO₂ totales. Este equipo es el que tiene una menor contribución sobre el total en todos los parámetros estudiados. Su relación entre emisiones y consumo es de 0,139 kgCO₂/kWhEP. Además, el programa HULC no calcula la demanda energética debida al equipo de ventilación, puesto que calcula la demanda de energía sensible, y esta no incluye la del equipo de ventilación.

Estos equipos no están directamente relacionados con la envolvente térmica del edificio. Esto quiere decir que realizar modificaciones en los cerramientos del edificio no afecta a los consumos, demandas y emisiones de estos dos equipos, los cuales permanecen invariables al modificar los forjados, como se puede observar en la tabla 10. Por tanto, no resulta de interés comparar los resultados para estos equipos al cambiar los forjados, ya que estos son siempre iguales.

En la siguiente tabla (tabla 11) se muestran los resultados obtenidos para los equipos de ACS y ventilación del caso B.

Valores equipos de ACS y ventilación						
	Equipo de ACS			Equipo de ventilación		
	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS	Forjado de hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP (kWh/m ² año)	26,3	26,3	26,3	1,1	1,1	1,1
Demanda energética (kWh/m ² año)	22,0	22,0	22,0	-	-	-
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2
Contribución de los equipos de generación de ACS y ventilación sobre el total						
	Equipo de ACS			Equipo de ventilación		
	Forjado hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS	Forjado hormigón	Forjado cerámico	Forjado EPS
Consumo de EP	32,9	36,3	37,9	1,4	1,5	1,8
Demanda energética	32,4	36,1	38,0	-	-	-
Emisiones de CO ₂	16,7	21,1	23,2	6,2	7,9	8,6

Tabla 11. Valores absolutos de los equipos de ACS y ventilación y contribución de cada uno de ellos sobre el total (caso B, edificio real).

Se incluyen a continuación las figuras 45 y 46, donde se muestran la contribución del equipo de ACS y de ventilación sobre los resultados globales. Primero se analizará la gráfica correspondiente al equipo de ACS (figura 45).

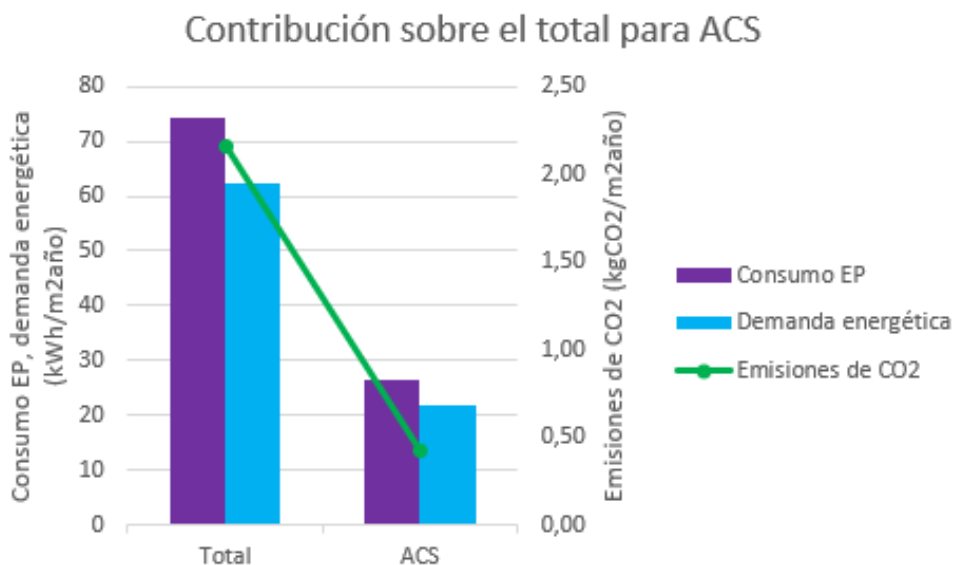


Figura 45. Contribución del equipo de ACS sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).

Para estos equipos, las diferencias entre el caso A y el B son menos significativas. Para el equipo de ACS hay una diferencia de 2,2kWh/m²año más en el caso A respecto al B en el consumo de EP, 2,6kWh/m²año menos en la demanda energética y 2kgCO₂/m²año más en las emisiones (tablas 10 y 11). Este equipo sigue siendo, para el consumo de EP y la demanda energética, el segundo con valores absolutos más altos, solo superado por el equipo de calefacción, como ocurría en el caso A. En este caso, para las emisiones de CO₂, el equipo de refrigeración alcanza valores superiores, lo cual no ocurría en el caso A. Aplicando la Ec. 8, se obtiene una relación entre emisiones y consumo de 0,015kgCO₂/kWhEP. Esta relación es 5,5 veces menor que la del mismo equipo del caso A, por lo que el equipo de ACS del caso B es energéticamente más eficiente.

Analizando la contribución sobre los resultados totales de este equipo para el caso B, se produce un aumento en esta respecto al caso A. Mientras que en el edificio simplificado estaba entre el 23 y el 27% para el consumo de EP, entre el 21 y el 24% para la demanda energética y entre el 11 y el 14% para las emisiones de CO₂ (tabla 10), en el edificio real suponen entre un 32 y un 38% para el consumo y la demanda; y entre un 16 y un 24% para las emisiones. Este aumento se debe a que, como se ha mencionado con anterioridad, este equipo no se ve afectado por la envolvente térmica del edificio, mientras que los de calefacción y refrigeración sí. Por tanto, al presentar este edificio una envolvente de mayor calidad, los valores en calefacción y refrigeración disminuyen, al igual que los totales, mientras que, en este caso, los resultados correspondientes a este equipo (a excepción de las emisiones, que sí que

disminuyen) son del mismo orden que los obtenidos en el caso A, por lo que la contribución respecto al total aumenta. En cuanto a las emisiones, al tener este equipo una eficiencia energética superior al del caso A, su contribución sobre el total presenta un crecimiento menor respecto al edificio simplificado que el consumo y la demanda.

Se expone ahora de forma gráfica la contribución del equipo de ventilación sobre los resultados totales para el caso B en la figura 46.

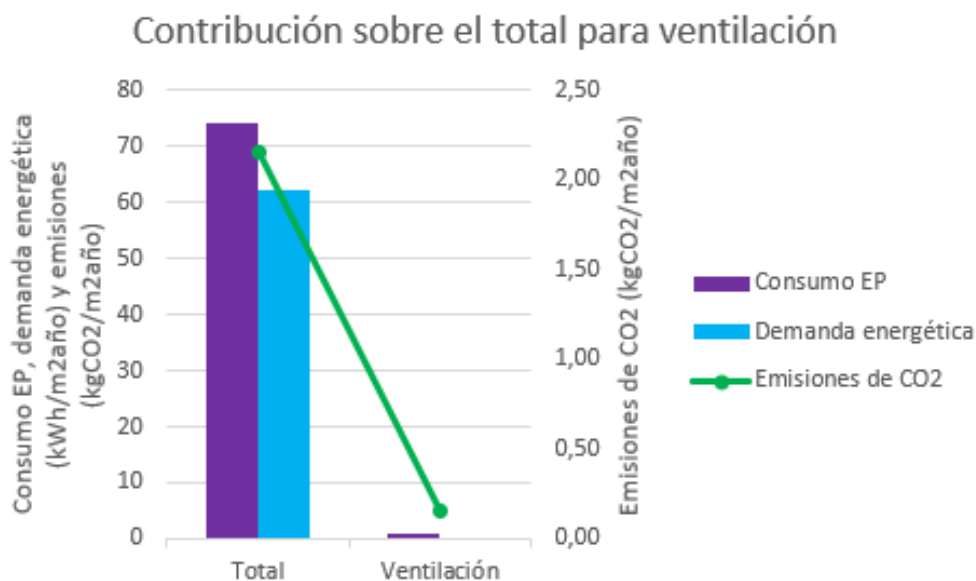


Figura 46. Contribución del equipo de ventilación sobre el total para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso B, edificio real).

Para el equipo de ventilación hay una diferencia de 5,1kWh/m²año en el caso A respecto al B en el consumo de EP y de 0,7kgCO₂/m²año más en las emisiones (tablas 10 y 11). Al igual que ocurría en el caso A, este es el equipo que menos energía consume y que menos emisiones genera. Aplicando la Ec. 8 se obtiene una relación de 0,188kgCO₂/kWhEP, la cual es 1,35 veces superior a la del caso A. Esto quiere decir que el equipo de ventilación empleado en el caso A es más eficiente que el del caso B.

Respecto a la contribución de este equipo sobre el total, la referente al consumo de EP es menor que en el caso A, siendo en el primer caso de entre un 5 y un 6% (tabla 10) y de entre un 1 y un 2% (tabla 11) en el segundo. La correspondiente a las emisiones de CO₂ aumenta en este caso. En el caso A se situaba entre el 4 y el 5%, mientras que en el caso B se sitúa entre un 6 y un 9% (tabla 11). Este aumento se debe a que el equipo de ventilación del caso A, como se ha mencionado, es más eficiente, por lo que produce menos emisiones por cada kWh de EP consumida por el equipo. Además, la gran

eficiencia del equipo de calefacción hace que la contribución del resto se vea más acentuada que en el caso A, donde un 75% de las emisiones se debían al equipo de calefacción.

4.2. Forjados con placa.

En este apartado se analizarán los cambios que se producen en el consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ al introducir una placa de aislamiento fabricada en EPS. Se estudiarán primero los cambios producidos en los resultados totales y posteriormente como afecta esta modificación a los equipos de climatización por separado. Los equipos de ACS y ventilación no se incluirán en este apartado, porque los resultados al incluir la placa (modificación de la envolvente térmica), como se ha mencionado en el apartado 4.1.4, permanecen invariables.

No se analizará aquí el caso B, puesto que los cerramientos horizontales (forjados y cubierta) del mismo ya tienen una capa de aislamiento de XPS (poliestireno extruido), y no resulta práctico incluir a mayores una capa de aislamiento de EPS. Por tanto, en este apartado solo se analizarán las diferencias que supone incluir la placa de EPS en el caso A.

4.2.1. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ totales.

En este apartado se muestran las variaciones que se generan en los tres parámetros de estudio al introducir en los forjados la placa de aislamiento. Para ello se ha generado la tabla 12, donde se muestran los siguientes datos:

- Valores absolutos del consumo de EP, demanda energética y emisiones para los tres forjados con placa.
- Valores comparativos de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS, todos ellos con placa, calculados a partir de la Ec. 6 y expresados en %.
- Valores comparativos de los forjados con placa respecto al mismo tipo de forjado sin placa, calculados mediante la Ec. 7 y expresados en %.

Valores absolutos			
	Forjado de hormigón con placa	Forjado cerámico con placa	Forjado EPS con placa
Consumo de EP (kWh/m ² año)	110,1	109,9	101,0
Demanda energética (kWh/m ² año)	82,3	82,1	75,0
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	17,8	17,8	16,1
Comparativa entre los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS total (%)			
	Hormigón con placa	Cerámico con placa	
Consumo de EP	+9,0	+8,7	
Demanda energética	+9,7	+9,5	
Emisiones de CO ₂	+11,0	+10,7	
Comparativa entre los forjados con placa respecto a los forjados sin placa (%)			
	Hormigón con placa	Cerámico con placa	EPS con placa
Consumo de EP	-9,1	-8,7	-7,3
Demanda energética	-8,3	-7,9	-7,1
Emisiones de CO ₂	-11,4	-10,9	-9,1

Tabla 12. Valores absolutos y comparativos de los resultados totales para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).

Se presentan a continuación las figuras 47 y 48 para facilitar la visualización de los resultados reflejados en la tabla 12. Primero se comentará la figura 47, la cual muestra la comparativa entre los forjados estudiados.

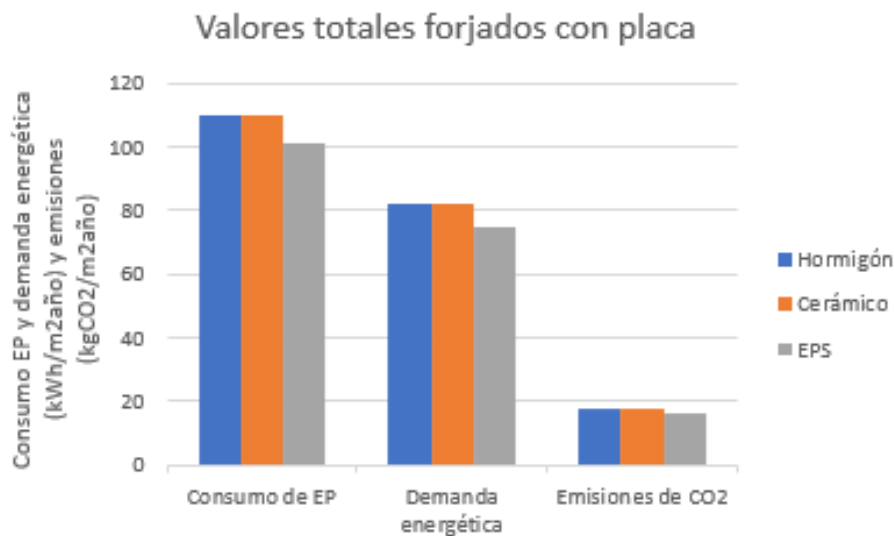


Figura 47. Valores totales de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).

La figura 47 permite ver que las diferencias entre los forjados se reducen respecto a las diferencias existentes entre estos cuando no tenían la placa de aislamiento (figura 33), aunque sigue siendo el forjado de EPS el que presenta un mejor comportamiento en todos los aspectos.

Se observa que el forjado de hormigón requiere un consumo de EP un 9% superior al de EPS y una demanda energética un 9,7% superior. Las diferencias en cuanto a las emisiones aumentan, emitiendo el forjado de hormigón un 11% más de CO₂ (tabla 12).

El forjado cerámico ofrece resultados mejores que el de hormigón. Este requiere un consumo de EP un 8,7% superior al de EPS, una demanda energética un 9,5% mayor y emite un 10,7% más (tabla 12). Estos signos positivos indican un peor comportamiento energético que el forjado de EPS.

A continuación, se muestran en la figura 48 los valores comparativos entre los forjados sin placa de aislamiento y los forjados con ella.

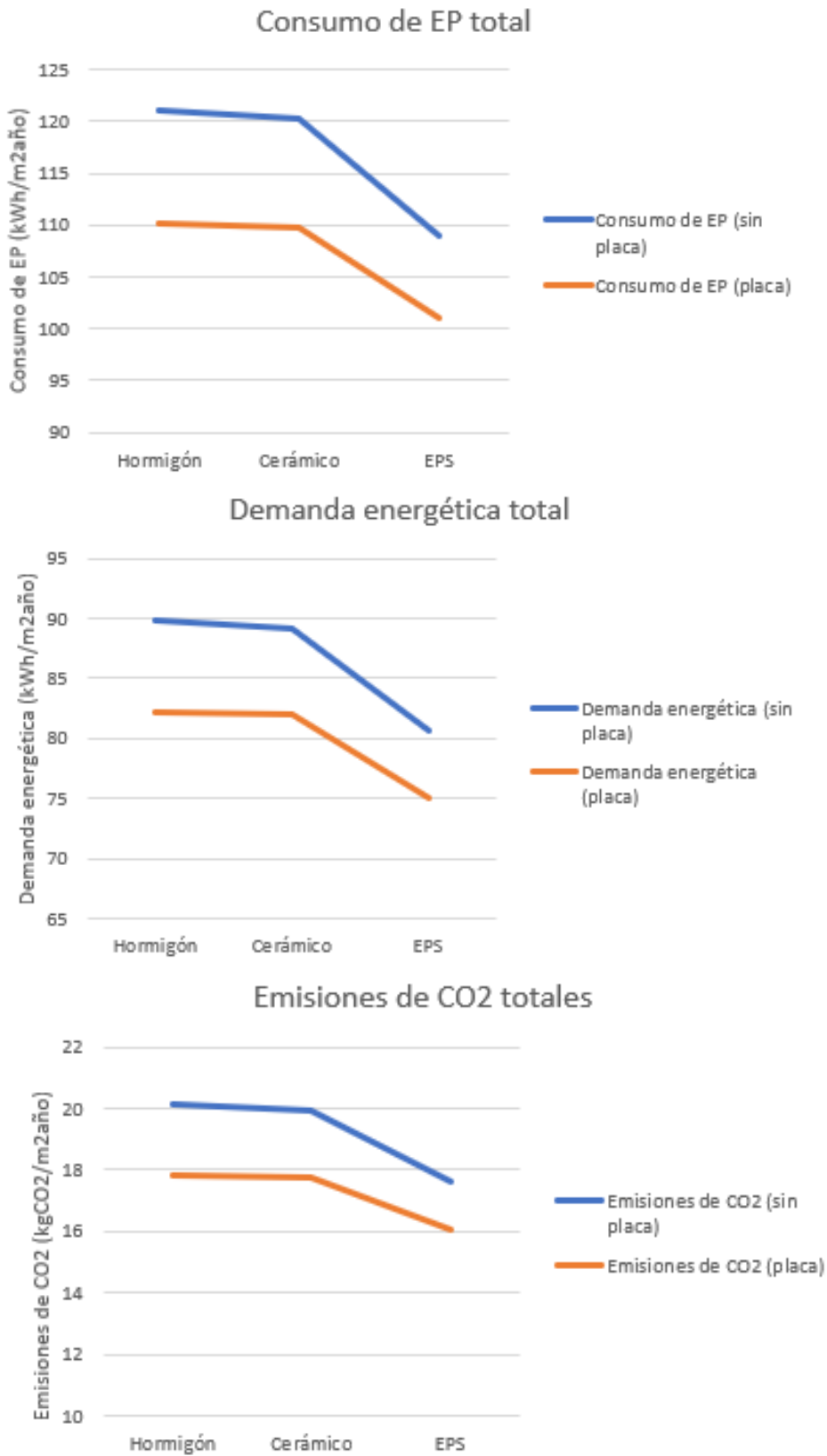


Figura 48. Valores comparativos entre los forjados con y sin placa para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio (caso A, edificio simplificado).

La figura 48 indica un mejor comportamiento energético de los forjados con placa respecto a los forjados sin ella. Esto lo indica además el signo negativo de los valores comparativos de la tabla 12. Los forjados de hormigón y cerámico son los que presentan un mayor cambio en los parámetros al añadir la placa, con reducciones de entre un 9,1 y un 11,4% para el de hormigón; y de entre un 8,7 y un 10,9% para el cerámico. El forjado de EPS es el que tiene una reducción menor, de entre un 7,3 y un 9,1%. Nuevamente son las emisiones de CO₂ las que se ven afectadas en mayor medida, siendo entre un 9,1 y un 11,4% inferiores para los forjados con placa (tabla 12).

Además, si nos fijamos en el espacio entre las líneas de la figura 48, se ve que en la zona del forjado de EPS es menor, lo cual quiere decir que añadir la placa de aislamiento provoca una menor variación en los parámetros para este forjado que para los otros dos, donde el espaciado entre las líneas es mayor.

4.2.2. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ en calefacción.

En este apartado se estudiarán los cambios que producen para el equipo de calefacción en los resultados, estimados por el programa, añadir la placa de aislamiento. Estos se han recogido en la tabla 13, la cual muestra los siguientes datos:

- Valores absolutos del consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ correspondientes al equipo de calefacción.
- Valores comparativos de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS, todos ellos con placa. Estos se han calculado mediante la Ec. 6 y se expresan en %.
- Valores comparativos de los forjados con placa respecto a los mismos sin ella, calculados mediante la Ec. 7 y expresados en %.

Valores absolutos calefacción			
	Forjado de hormigón con placa	Forjado cerámico con placa	Forjado EPS con placa
Consumo de EP (kWh/m ² año)	60,7	60,4	52,9
Demanda energética (kWh/m ² año)	47,3	47,1	41,5
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	12,5	12,5	10,9
Comparativa entre los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS calefacción (%)			
	Hormigón con placa	Cerámico con placa	
Consumo de EP	+14,6	+14,1	
Demanda energética	+14,1	+13,7	
Emisiones de CO ₂	+14,3	+13,9	
Comparativa entre los forjados con placa respecto a los forjados sin placa calefacción (%)			
	Hormigón con placa	Cerámico con placa	EPS con placa
Consumo de EP	-18,8	-18,1	-14,1
Demanda energética	-18,4	-17,8	-13,7
Emisiones de CO ₂	-17,8	-17,2	-13,5

Tabla 13. Valores absolutos y comparativos del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).

Se mostrarán, además, para una mejor visualización de los datos de la tabla 13, las figuras 49 y 50, donde se incluyen, respectivamente, la comparación entre los forjados estudiados y las diferencias entre los forjados con placa y sin placa.

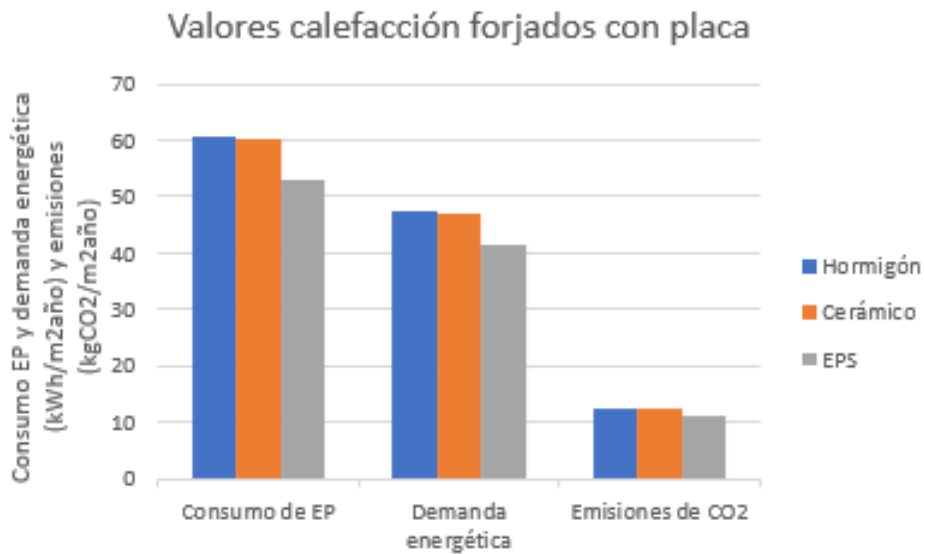


Figura 49. Valores del equipo de calefacción para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).

Sobre la figura 49 queda expuesto que el forjado de EPS ofrece mejores resultados que el de hormigón y el cerámico, como refleja el signo positivo de los resultados comparativos. El forjado de hormigón requiere un consumo de EP un 14,6% mayor, una demanda energética un 14,1% superior y un 14,3% más de CO₂ emitido a la atmósfera (tabla 13).

El forjado cerámico requiere un consumo de EP un 14,1% superior al de EPS, una demanda energética un 13,7% superior y un 13,9% más de emisiones (tabla 13). Estos resultados son mejores en comparación a los del forjado de hormigón.

A continuación, en la figura 50, se muestran las diferencias entre los forjados con placa y los forjados sin placa.

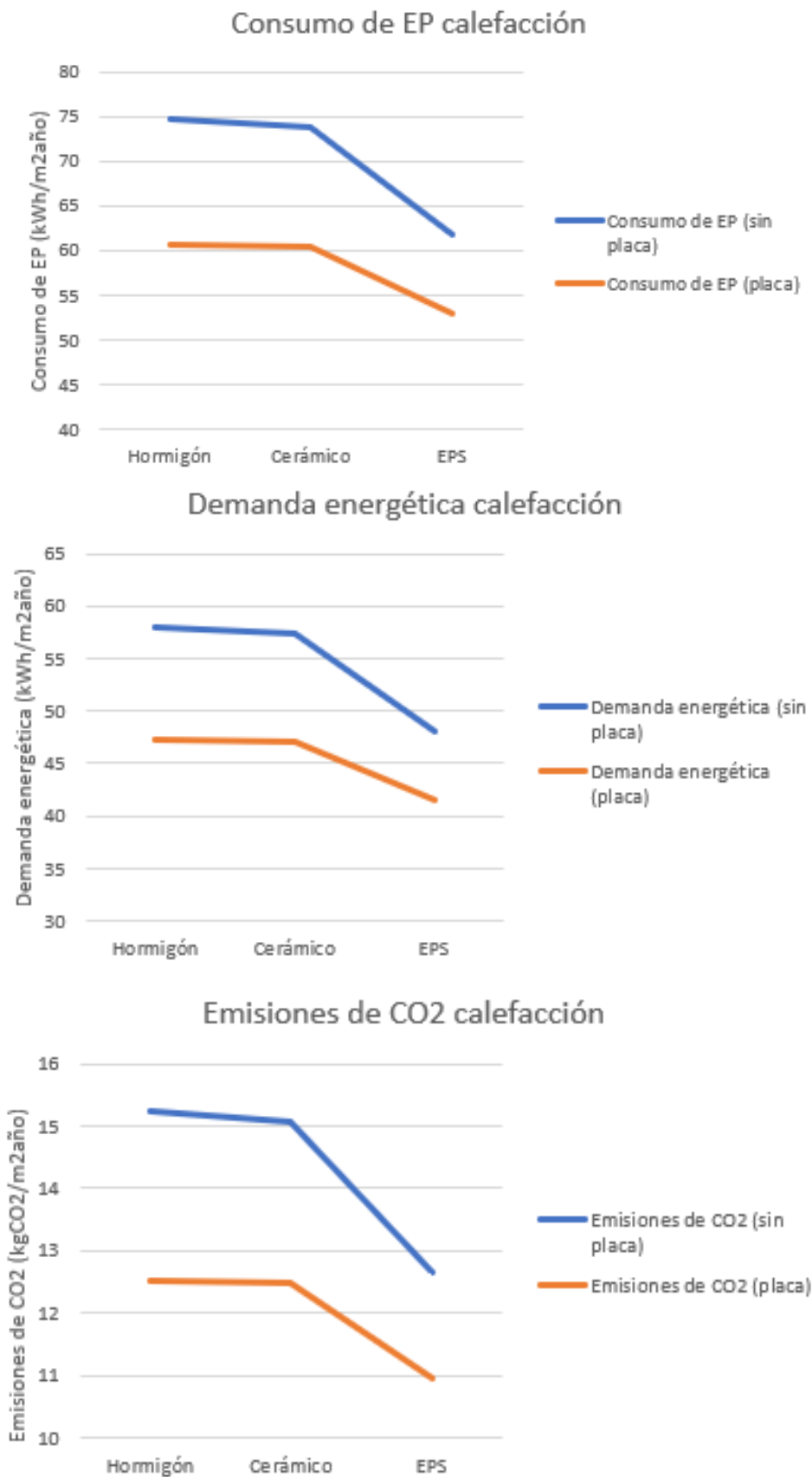


Figura 50. Valores comparativos entre los forjados con y sin placa de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para el equipo de calefacción (caso A, edificio simplificado).

Observando la figura 50 se aprecia una mejoría mayor en los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS, como refleja la tabla 13 numéricamente. Además, en comparación con la mejoría que se conseguía en los resultados totales, la obtenida para el equipo de calefacción es superior. La menor separación entre las líneas en la zona del forjado de EPS nos indica que este es el forjado sobre el que se produce una menor variación en los parámetros al añadir la placa.

El forjado de hormigón es el que tiene unas variaciones mayores al añadir la placa, siendo estas de entre un 17,8 y un 18,8%. El siguiente forjado con una mayor diferencia al añadir la placa es el cerámico, con variaciones entre un 17,2 y un 18,1%. El forjado de EPS es sobre el que se observa una menor variación cuando se introduce la placa, siendo estas de entre un 13,5 y un 14,1% (tabla 13). Estas mejorías al añadir la placa se ven reflejadas por el signo negativo.

4.2.3. Consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ en refrigeración.

En este apartado se estudiarán los cambios que genera añadir la placa de aislamiento en los forjados sobre los resultados estimados por el programa, en este caso para el equipo de refrigeración. Estos resultados se muestran numéricamente en la tabla 14, donde se representan los siguientes datos:

- Valores absolutos del consumo de EP, demanda energética y emisiones de CO₂ para el equipo de refrigeración.
- Variación de los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS, para los tres parámetros anteriores. Estos cambios se han calculado a partir de la Ec. 6 y se expresan en %.
- Variación de los forjados con placa en comparación a los forjados sin placa, calculados mediante la Ec. 7 y expresados en %.

Valores absolutos refrigeración			
	Forjado de hormigón con placa	Forjado cerámico con placa	Forjado EPS con placa
Consumo de EP (kWh/m ² año)	14,7	14,7	13,3
Demanda energética (kWh/m ² año)	15,9	15,9	14,1
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ² año)	2,1	2,1	1,9
Comparativa entre los forjados de hormigón y cerámico respecto al de EPS refrigeración (%)			
	Hormigón con placa	Cerámico con placa	
Consumo de EP	+10,5	+10,5	
Demanda energética	+12,8	+12,8	
Emisiones de CO ₂	+10,5	+10,5	
Comparativa entre los forjados con placa respecto a los forjados sin placa refrigeración (%)			
	Hormigón con placa	Cerámico con placa	EPS con placa
Consumo de EP	+25,9	+25,3	+6,6
Demanda energética	+25,8	+25,2	+6,6
Emisiones de CO ₂	+25,8	+25,0	+6,3

Tabla 14. Valores absolutos y comparativos del equipo de refrigeración para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).

Se incluyen, para mejorar la visualización de los datos de la tabla 14, las figuras 51 y 52. En la figura 51 se representan las diferencias entre los tres forjados analizados, con placa. En la figura 52 aparecen las diferencias entre los forjados con y sin placa.

En la figura 51 se puede visualizar una mejora del forjado de EPS respecto a los de hormigón y cerámico, los cuales muestran resultados iguales.

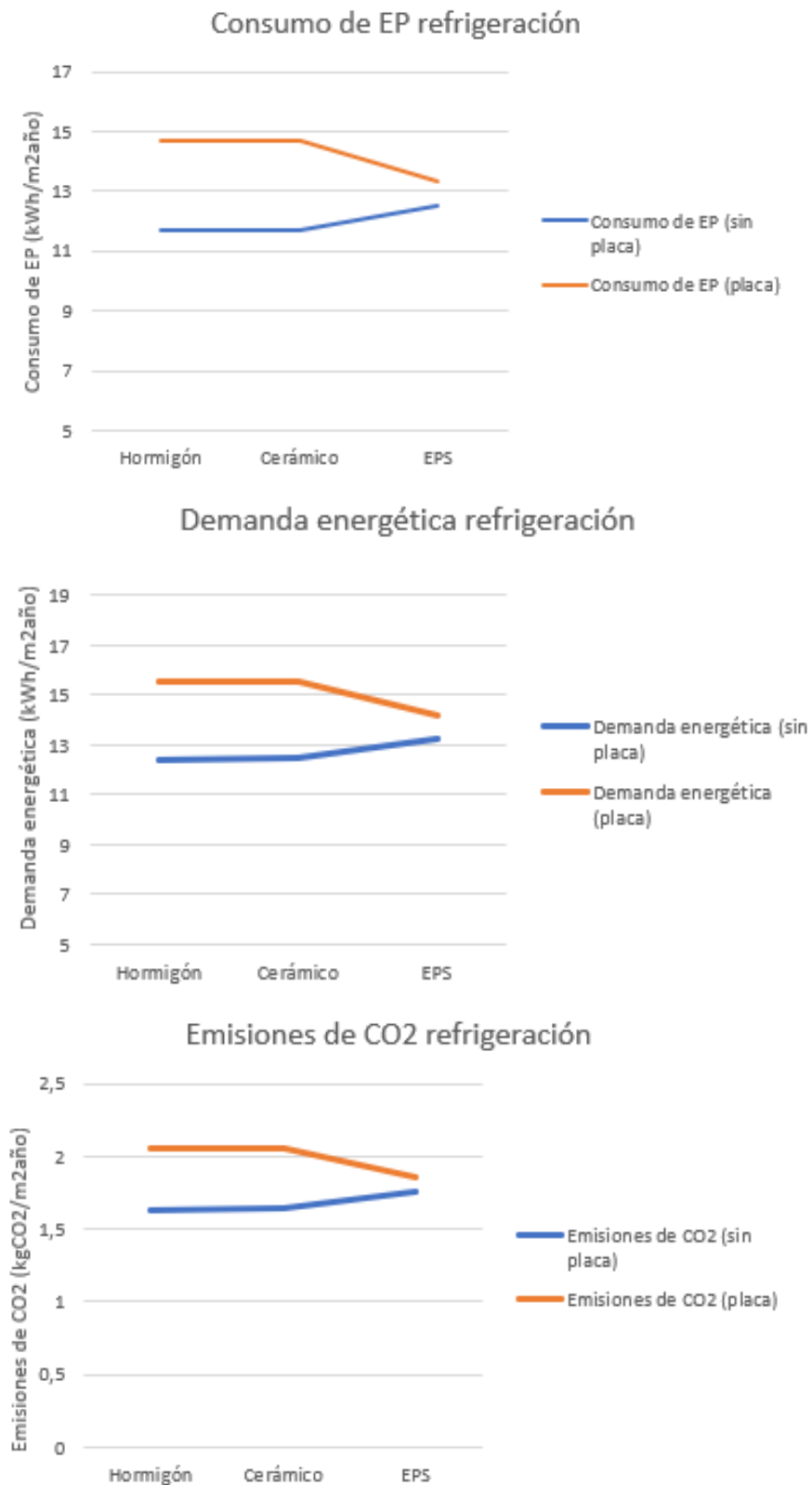


Figura 51. Valores comparativos entre los forjados con y sin placa de los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio para el equipo de refrigeración (caso A, edificio simplificado)

Para el equipo de refrigeración, los resultados obtenidos para los forjados de hormigón y cerámico son iguales, por lo que sus variaciones respecto al forjado de EPS también lo son, siendo un 10,5% superiores para el consumo de EP y las emisiones de CO₂, y un 12,8% superiores para la demanda energética, lo cual indica el signo positivo (tabla 14). Estos resultados son inferiores a los obtenidos para el equipo de refrigeración, por lo que introducir la placa supone mejoras mayores para calefacción en invierno que para refrigeración en verano.

A continuación, se muestran, en la figura 52, las diferencias que supone añadir la placa de aislamiento a los forjados.

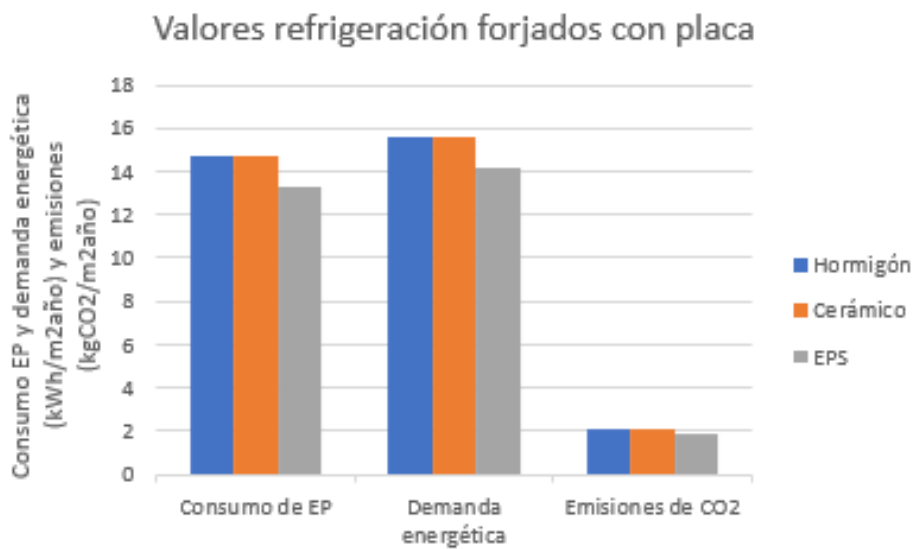


Figura 52. Valores del equipo de refrigeración para los parámetros principales relacionados con el comportamiento energético del edificio en los forjados con placa (caso A, edificio simplificado).

En la figura 52 se observa el mayor aumento al introducir la placa en los forjados de hormigón y cerámico respecto al aumento en el de EPS, como reflejaban los porcentajes de la tabla 14. En la figura 52 se ve que las líneas convergen, y que el espacio entre estas es menor en el forjado de EPS que en los otros dos. Esto quiere decir que el forjado de EPS es el que tiene una menor variación en sus parámetros al añadir la placa de EPS. Este forjado es el que tiene unos valores más elevados cuando no se introduce la placa, pero es el que tiene unos valores menores cuando se introduce, por eso la separación entre las líneas es más notable para el equipo de refrigeración que para el de calefacción y el total, puesto que es el único caso en el que ocurre esto.

Introducir la placa en el forjado supone un empeoramiento en todos los parámetros para este equipo, como muestra el signo positivo. Sin embargo, existen diferencias entre los forjados de hormigón y cerámico respecto al de

EPS. Introducir la placa supone un aumento en los consumos, demandas y emisiones de entre un 25,8 y un 25,9% para el forjado de hormigón. Para el cerámico supone un aumento de entre el 25 y el 25,3%. Sin embargo, para el forjado de EPS supone un aumento de entre un 6,3 y un 6,6% (tabla 14).

4.3. Calificación energética.

En este apartado se presentará la calificación energética de los casos de estudio. En primer lugar, se mostrará la calificación del caso A (edificio simplificado) con los tres forjados de estudio, EPS, hormigón y cerámico. Después, se analizará la variación en la calificación de este edificio al añadir la placa de EPS. Por último, se comparará la calificación del caso A con el caso B (edificio real).

Como se ha presentado en el apartado 4, la calificación energética se muestra mediante letras en base a las emisiones del edificio estudiado, catalogándose de la letra A, que representa el mejor comportamiento energético, a la letra G, que representa el peor. A continuación, se mostrarán las calificaciones energéticas de los casos expuestos.

En primer lugar, se mostrará la calificación energética del edificio simplificado con el forjado de hormigón y sin placa, la cual se puede ver en la figura 53.

Como se observa en la figura, el forjado con una peor catalogación energética es el de hormigón, en la categoría D, con unas emisiones de 20,1 kgCO₂/m²año. Los forjados cerámico y de EPS se sitúan ambos en la categoría C. Sin embargo, el forjado cerámico, con unas emisiones de 19,9 kg CO₂/m²año, es peor que el de EPS, con 17,7 kgCO₂/m²año. Por tanto, entre los tres forjados sin placa para el caso A, el que tiene una mejor calificación energética es el forjado de EPS.

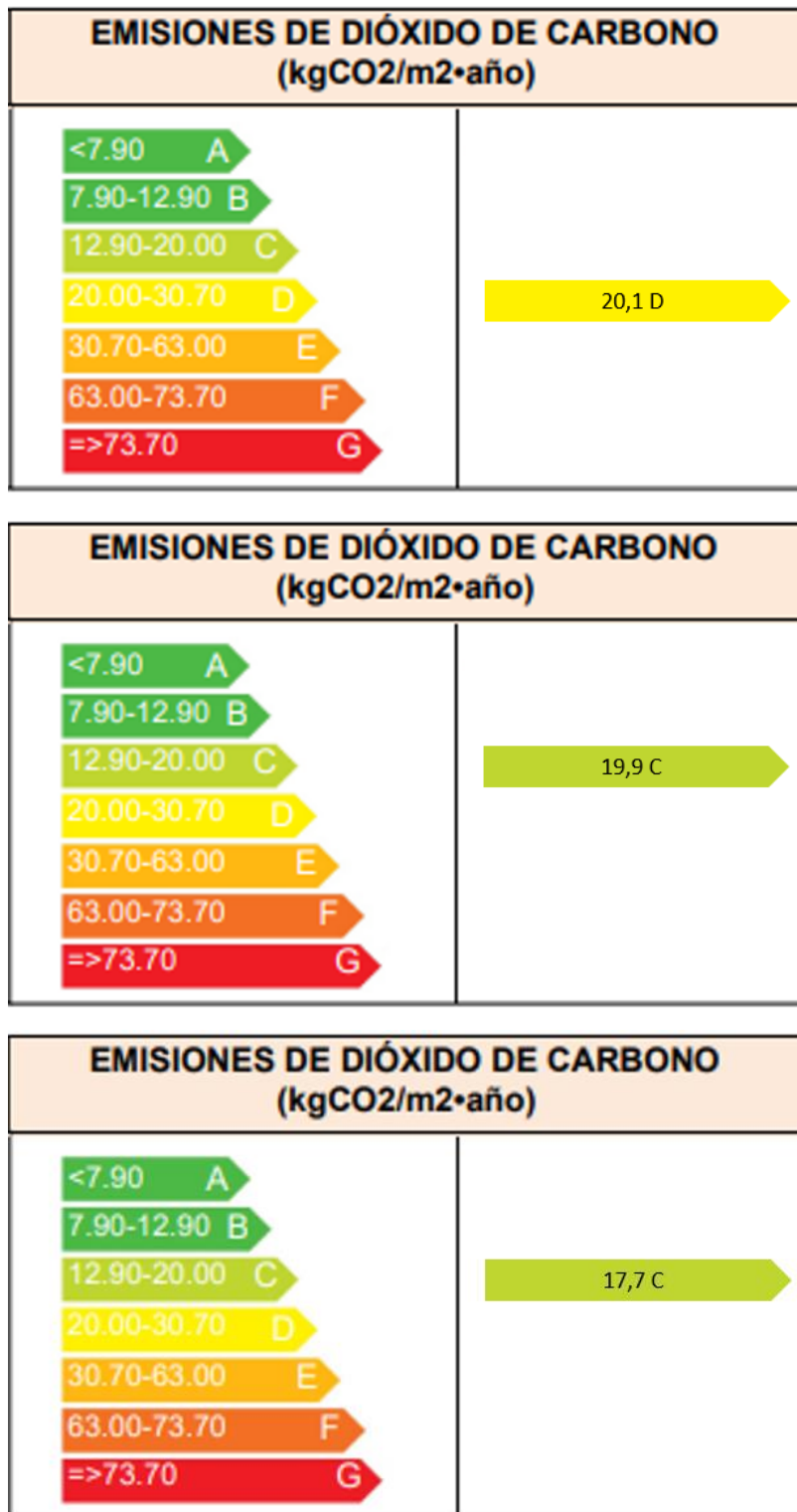


Figura 53. Calificación energética en base a las emisiones de CO₂ totales de los forjados sin placa para el caso A (edificio simplificado). Las calificaciones se corresponden, de arriba hacia abajo, al forjado de hormigón, cerámico y EPS.

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

Se muestran a continuación las calificaciones energéticas para los tres forjados del caso A, ahora incluyendo la placa de aislamiento de EPS. Estas aparecen en la figura 54.

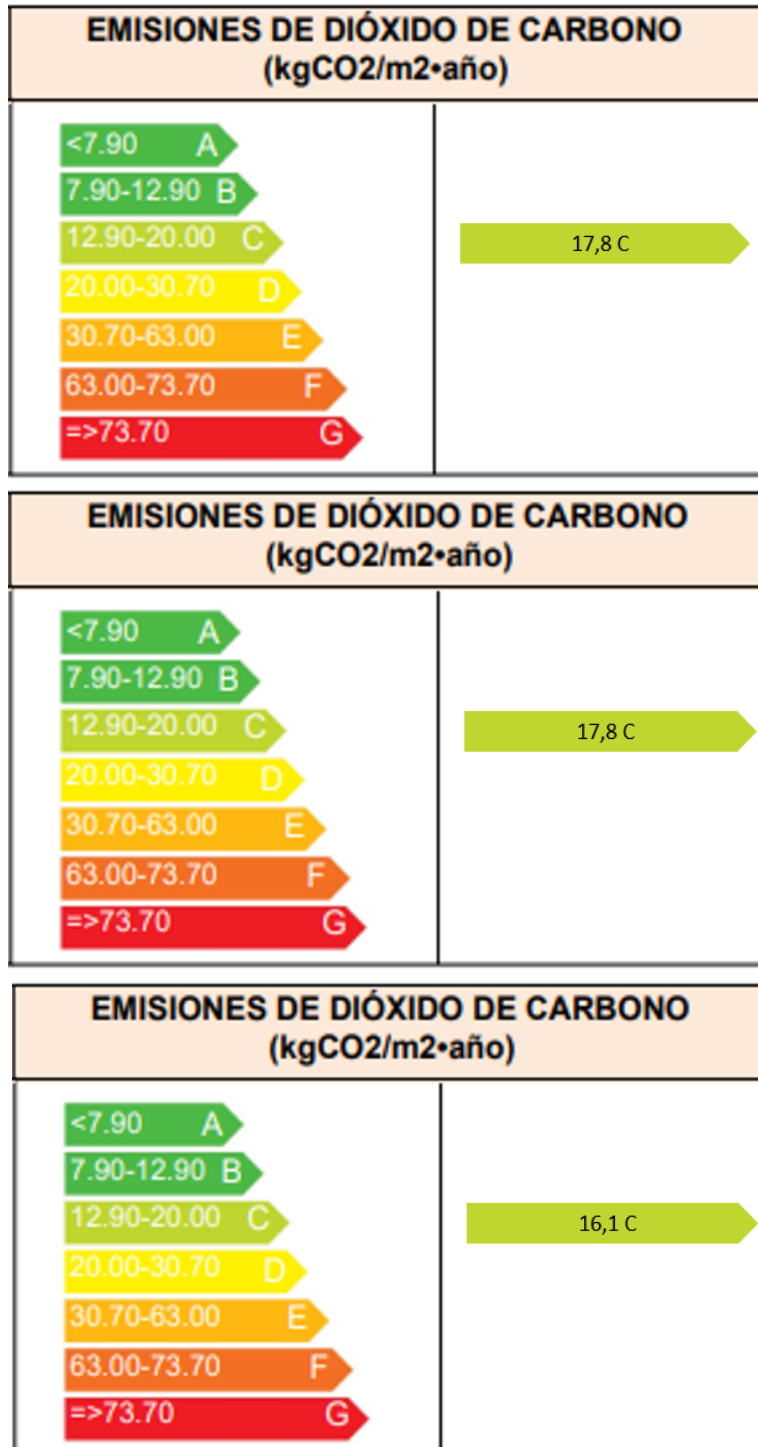


Figura 54. Calificación energética en base a las emisiones de CO₂ totales de los forjados con placa para el caso A (edificio simplificado). Las calificaciones se corresponden, de arriba hacia abajo, al forjado de hormigón, cerámico y EPS.

Al añadir la placa de aislamiento, queda reflejado que el forjado que tiene una mejoría superior en cuanto a su comportamiento energético es el forjado de hormigón, el cual pasa de tener unas emisiones de 20,1 a 17,8 kgCO₂/m²año, pasando a la categoría C. Los forjados cerámico y de EPS, aunque su categoría no cambia respecto al caso en el que no tenían placa, sus emisiones se reducen. El edificio con el forjado cerámico pasa de 19,9 a 17,8 kgCO₂/m²año, igualándose al forjado de hormigón. El forjado de EPS pasa de 17,7 a 16,1 kgCO₂/m²año, siendo nuevamente el forjado con mejor comportamiento energético.

ANÁLISIS Y COMPARATIVA ENERGÉTICA DEL FORJADO ALIGERADO FRENTE A OTRAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES

En la figura 55 se muestran las calificaciones energéticas del caso B, correspondiente al edificio real.

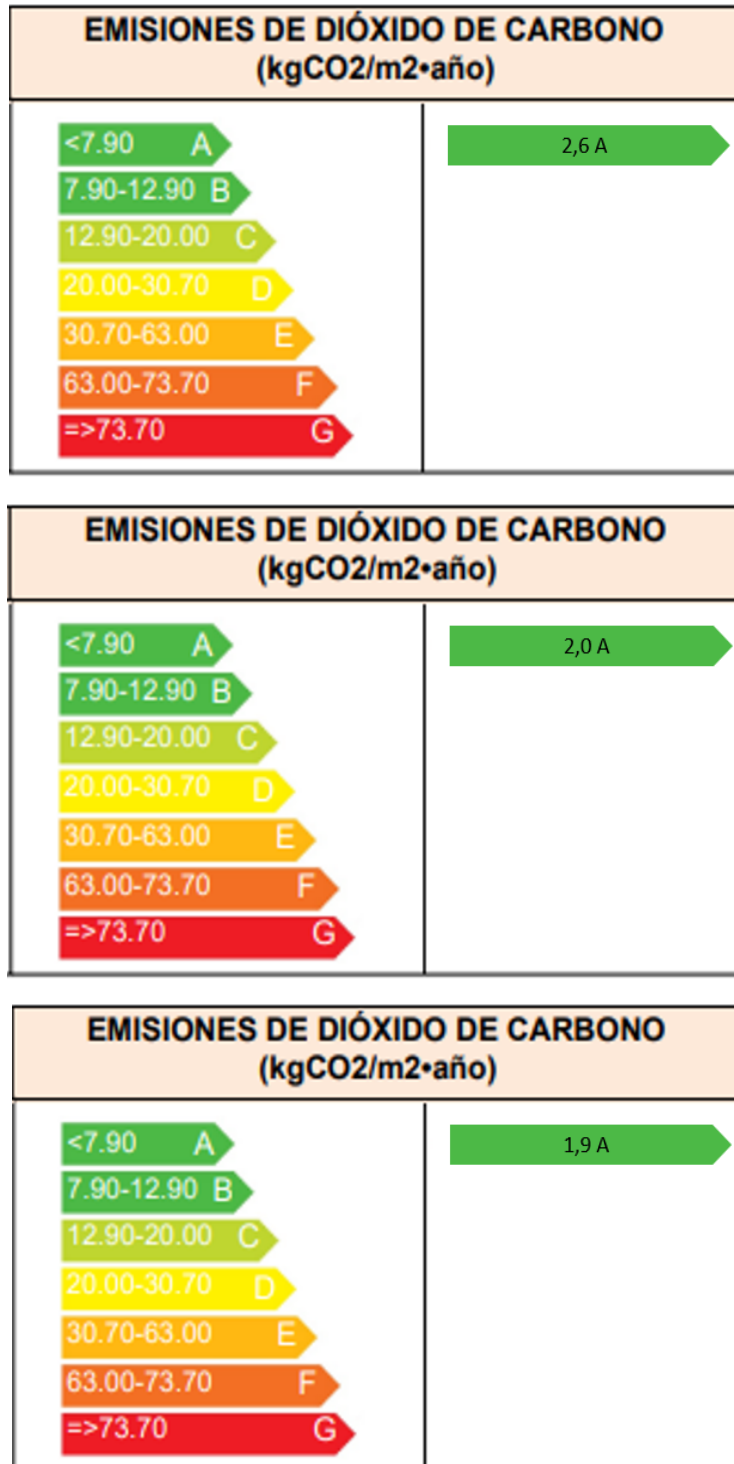


Figura 55. Calificación energética en base a las emisiones de CO₂ totales de los forjados para el caso B (edificio real). Las calificaciones se corresponden, de arriba hacia abajo, al forjado de hormigón, cerámico y EPS.

En esta figura se puede ver un mejor comportamiento energético para todos los forjados respecto al caso A, pasando de una calificación C a una A. Además, se refleja una igualación entre el comportamiento de los tres forjados respecto al caso A, siendo las diferencias entre estos de menos de 1 kgCO₂/m²año. El forjado de hormigón pasa de tener una calificación C y unas emisiones de 17,8 kgCO₂/m²año en la mejor de las situaciones del caso A (forjado con placa) a poseer una calificación A y unas emisiones de 2,6 kgCO₂/m²año. El forjado cerámico pasa de una calificación C a una A y de unas emisiones de 17,8 kgCO₂/m²año en la mejor de las situaciones del caso A (forjado con placa) a 2,0 kgCO₂/m²año en el caso B. El forjado de EPS pasa de tener una calificación C y unas emisiones de 16,1 kgCO₂/m²año en la mejor situación del caso A (forjado con placa) a contar con una calificación A y unas emisiones de 1,9 kgCO₂/m²año en el caso B. Por tanto, queda de nuevo demostrado el mejor comportamiento del edificio real respecto al simplificado, además de que el forjado de EPS es el que muestra una mejor eficiencia energética de los tres.

5. Estudio económico del Trabajo de Fin de Grado.

En este apartado se realizará un análisis de los gastos que ha supuesto la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Para ello, es necesario tener en cuenta las etapas de elaboración del mismo, con los materiales consumidos en cada una de ellas. A su vez, deben conocerse los trabajadores partícipes en el trabajo, así como las horas dedicadas por estos.

Se presentará un primer apartado donde se expondrán las etapas que se han seguido en la elaboración del proyecto, así como los materiales empleados en ellas. En un segundo apartado se expondrán los costes derivados de los materiales empleados durante el proyecto y de las horas invertidas para su elaboración.

5.1. Etapas del Trabajo de Fin de Grado.

La elaboración de este trabajo ha supuesto una duración de 4 meses, y puede dividirse en tres etapas diferentes, las cuales serían las expuestas a continuación:

- Recopilación de información (7 semanas). En esta etapa se ha realizado una recopilación y lectura de diferentes fuentes bibliográficas, para la redacción del marco teórico del proyecto. Entre estas fuentes destacan artículos de revistas científicas, normativas relacionadas con la eficiencia energética, libros relacionados con la certificación energética y las instalaciones térmicas y páginas web de fabricantes y asociaciones relacionadas con el poliestireno expandido.
- Aprendizaje del manejo de la herramienta de cálculo (3 semanas). En esta etapa se ha procedido al aprendizaje del manejo de la herramienta de cálculo HULC, mediante la lectura del manual de usuario proporcionado por la web del Código Técnico de la Edificación y la realización de simulaciones previas.
- Realización de los cálculos (8 semanas). En esta etapa se ha procedido al modelado y simulación de los edificios mostrados en el proyecto, empleando la herramienta de cálculo HULC, cuya licencia es gratuita y de libre acceso.
- Redacción del documento (7 semanas). Durante esta etapa se ha redactado el Trabajo de fin de grado, incluyendo toda la información teórica necesaria extraída de la búsqueda bibliográfica y los resultados obtenidos de los cálculos realizados, incluyendo la elaboración de gráficas empleando Excel.

A lo largo de todo el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado se ha empleado un ordenador portátil hp Intel Core i3, junto con un ratón acer SM-9023, tanto para

la búsqueda bibliográfica, como para la utilización del programa y redacción del documento.

A continuación, en la figura 56, se muestra un diagrama de Gantt con las etapas que se han realizado en el Trabajo de Fin de Grado.

Actividades	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Recopilación de información																
Aprendizaje de empleo de la herramienta de cálculo																
Realización de cálculos																
Redacción del documento																

Figura 56. Diagrama de Gantt del desarrollo del Trabajo de Fin de Grado.

5.2. Costes del Trabajo de Fin de Grado.

En este apartado se analizarán los costes que ha supuesto la realización del Trabajo de Fin de Grado, en base a las horas trabajadas y al coste de los equipos empleados para el desarrollo del proyecto.

En primer lugar, hay que tener en cuenta las horas trabajadas. El trabajo se inició el día 1 de enero y se concluyó el día 24 de abril. En este periodo existen 4 días festivos, correspondientes a los días 2 y 6 de enero y 6 y 7 de abril. Además, se tienen en cuenta como días no laborables los correspondientes a los fines de semana. Además, se establecen 2,5 días de vacaciones por mes trabajado. Se muestra a continuación, en la tabla 15, el cálculo de las horas laborales en el periodo de ejecución del Trabajo de fin de grado.

Duración del trabajo (días)	114
Sábados y domingos	33
Vacaciones	$2,5 \times 4 = 10$
Festivos	4
Días hábiles	$114 - (33+10+4) = 67$
Horas efectivas	$67 \times 8 = 536$

Tabla 15. Cálculo de horas efectivas en la realización del Trabajo de Fin de Grado.

El proyecto ha sido realizado por un trabajador con la categoría profesional de ingeniero, establecido en el grupo profesional II, con un nivel salarial 2 [DGT]. En base a esta información, se ha obtenido el coste de la mano de obra, expuesto en la tabla 16, a partir de la resolución del 27 de febrero de 2023 emitido por la Dirección General de Trabajo, publicado en el Boletín Oficial del Estado el 23 de marzo de 2023 [DGT].

Salario mensual x 14 (€)	Salario anual (€)	Plus convenio según art. 38 (€)	Total anual (€)	Total mensual (€)	Total diario (€)	Total por hora (€)
1348,36	18877,04	2444,61	21321,65	1776,80	112,22	14,03

Tabla 16. Coste de la mano de obra empleada en la realización del Trabajo de Fin de Grado, en €.

Se incluyen ahora los costes del material empleado para la realización del Trabajo de Fin de Grado. Como se ha comentado en el apartado 5.1, se ha empleado un ordenador portátil y un ratón. En cuanto a la licencia de la herramienta de trabajo HULC, no se tendrá en cuenta, puesto que es gratuita y de libre acceso.

En la tabla 17 se presentan los costes finales del Trabajo de Fin de Grado, donde se incluyen los costes de mano de obra expuestos en la tabla 16 y los costes asociados al material de trabajo.

Costes asociados a la mano de obra	
Salarios	14,03 x 536 = 7520,08
Costes asociados al material	
Ordenador portátil hp Intel Core i3	419,99
Ratón acer SM-9023	14,99

Tabla 17. Costes totales del Trabajo de Fin de Grado, en €.

Observando la tabla 17, el coste del Trabajo de Fin de Grado asciende a un total de $7520,08 + 419,99 + 14,99 = 7955,06$ €.

6. Conclusiones y líneas de futuro.

Una vez analizados los resultados, en este apartado se presentarán una serie de conclusiones en base a los objetivos propuestos en el apartado 1.3. Una vez expuestas las conclusiones, se establecerán una serie de líneas de futuro con el propósito de mejorar el trabajo ya existente.

Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- A partir de la firma del Protocolo de Kyoto, la Unión Europea firmó la Directiva sobre el Rendimiento Energético de los Edificios (Energy Performance in Buildings Directive (EPBD)), y con ella los distintos países han ido adaptando sus normativas para ajustarse a las exigencias de este pacto, generando modelos y herramientas de certificación energética. Sin embargo, existen diferencias en la efectividad de aplicación de estas directivas entre los distintos países de la UE, siendo los países del centro y norte de Europa más efectivos que los del sur.

En España la aprobación del Código Técnico de la Edificación, con los documentos básicos de ahorro energético (DBHE) y salubridad (DBHS) y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE), han sido la normativa básica para cumplir con el EPBD y para generar herramientas de certificación energética como HULC o CERMA.

- En general, la incorporación de forjados de EPS en los edificios, debido a su mayor capacidad aislante, supone un ahorro energético en las viviendas, tanto durante el tiempo de uso como en la etapa de retirada del mismo, dada su reciclabilidad una vez terminado el ciclo de vida del producto. Además, debido a su baja densidad, la puesta en obra de forjados de EPS es más sencilla y requiere menos energía que la colocación de un forjado tradicional de hormigón o cerámico, reduciendo también la energía necesaria en la etapa de construcción del edificio.
- Analizados los dos casos de estudio de este Trabajo de Fin de Grado, la inclusión de un forjado de EPS en lugar de los tradicionales de hormigón o cerámico supone ahorros energéticos durante el uso de la vivienda. El forjado de hormigón supone un incremento en el consumo de energía total de un 11,2% para el edificio simplificado y de un 15,6% para el edificio real respecto al forjado de EPS, siendo estos incrementos de 12,2 y 10,8 kWh/m²año respectivamente. El forjado cerámico produce un aumento de la energía total consumida de un 11,3% para el edificio simplificado y de un 4,6% para el edificio real, siendo éstos de 11,8 y 3,2 kWh/m²año respectivamente. En cuanto a las emisiones de CO₂ totales, el forjado de hormigón ofrece unos aumentos de un 13,9% para el edificio simplificado y de un 36,8% para el edificio real respecto al

forjado de EPS, siendo estos de 2,4 y 0,7 kgCO₂/m²año respectivamente. El forjado cerámico produce un aumento en las emisiones de CO₂ a la atmósfera de un 13,0% para el edificio simplificado y de un 5,3% para el edificio real, siendo estos incrementos de 2,2 y 0,1 kgCO₂/m²año respectivamente.

- Desglosando la energía total, las mayores diferencias entre los forjados estudiados se producen en el apartado correspondiente a la calefacción del edificio. En este caso, el forjado de hormigón produce un aumento en la energía consumida para calefacción de un 21,1% para el edificio simplificado y de un 17,4% para el edificio real, siendo estos aumentos de 13,0 y 6,5 kWh/m²año respectivamente. Para el forjado cerámico se obtiene un incremento de la energía consumida en calefacción respecto al forjado de EPS de un 19,7% para el edificio simplificado y de un 6,1% para el edificio real, siendo estos aumentos de 12,1 y 2,3 kWh/m²año respectivamente. En cuanto a las emisiones de CO₂ en calefacción, el forjado de hormigón genera un aumento respecto al de EPS de un 24,4% para el edificio simplificado y de un 33,3% para el edificio real, siendo estos incrementos de 2,5 y 0,7 kgCO₂/m²año respectivamente. El forjado cerámico muestra un incremento de un 19,0% para el edificio simplificado y de un 16,7% para el edificio real en el apartado de calefacción respecto al forjado de EPS, siendo estos aumentos de 2,4 y 0,1 kgCO₂/m²año respectivamente.

La contribución en refrigeración, ACS y refrigeración presenta diferencias menos significativas entre los edificios estudiados.

- Introducir la capa aislante de EPS en los forjados produce una mejora en los resultados obtenidos, tanto para la energía total consumida como para las emisiones totales. En cuanto a la energía total consumida, se produce una reducción de un 9,1% para el forjado de hormigón, de un 8,7% para el forjado cerámico y de un 7,3% para el forjado de EPS. En cuanto a las emisiones de CO₂, se obtiene una reducción de un 11,4% para el forjado de hormigón, de un 10,9% para el forjado cerámico y de un 9,1% para el forjado de EPS. Con estos resultados, añadir la placa de EPS produce una mejoría superior en el forjado de hormigón que en los otros dos.
- El forjado de EPS es el que presenta una mejor calificación energética en todos los casos de estudio respecto a los forjados de hormigón y cerámico. Para el edificio simplificado y sin placa de aislamiento, emite 2,4 y 2,2 kgCO₂/m²año menos que los forjados de hormigón y cerámico respectivamente. Para el edificio simplificado y con la placa de aislamiento, emite 1,7 kgCO₂/m²año que ambos forjados. Para el edificio real emite 0,7 y 0,1 kgCO₂/m²año menos que el forjado de hormigón y cerámico respectivamente.

Añadir la placa de aislamiento de EPS también supone una mejora para los tres forjados estudiados. Incluir esta placa supone una reducción en las emisiones de 2,3 kgCO₂/m²año para el forjado de hormigón, de 2,1 kgCO₂/m²año para el forjado cerámico y de 1,6 kgCO₂/m²año para el forjado de EPS.

- El edificio real supone una mejoría en la eficiencia energética respecto al edificio simplificado. Comparando la mejor situación del edificio simplificado, es decir, los forjados con placa de aislamiento, el edificio real ofrece unas emisiones de 15,2 kgCO₂/m²año para el forjado de hormigón, de 15,8 kgCO₂/m²año para el forjado cerámico y de 14,2 kgCO₂/m²año para el forjado de EPS. Además, mientras que en el edificio simplificado la calificación energética era de C o D, en el edificio real el edificio presenta una calificación energética A, siendo la mejor posible que se puede obtener.

En cuanto a los objetivos académicos relacionados con las competencias profesionales del título expuestas en el apartado 1.3, éstas se han desarrollado de la siguiente manera:

- Se ha realizado una amplia búsqueda bibliográfica, la cual ha sido necesario analizar y sintetizar para incluir en el Trabajo de Fin de Grado los aspectos más importantes y relacionados con el mismo.
- Se ha realizado una memoria del trabajo, en la cual se ha plasmado y analizado de forma escrita toda la información calculada y recopilada de fuentes bibliográficas.
- Este Trabajo de Fin de Grado se ha redactado de forma autónoma, además de que se ha aprendido, también de forma autónoma, el manejo de las herramientas necesarias para la obtención de resultados, como es el uso de la herramienta informática HULC.
- Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado ha sido necesario analizar bibliografía relacionada con la sostenibilidad y el medioambiente, así como el manejo de programas orientados a la certificación energética de edificios, como es la herramienta HULC.
- Para el modelado de los edificios estudiados en la herramienta HULC, ha sido necesario definir equipos de climatización, así como cerramientos con una determinada conductividad térmica.
- Debido a que este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado en colaboración con la empresa FOREL, este trabajo puede ser de aplicación en una empresa, en el ámbito de la certificación y estudio del comportamiento energético de un edificio.

Se presentan a continuación una serie de líneas de futuro:

- Realizar un estudio en mayor detalle de los elementos constructivos del edificio simplificado, tanto cerramientos verticales como horizontales, carpintería, etc., con el objetivo de mejorar su capacidad de aislamiento y, por tanto, su eficiencia energética.
- Estudiar distintas posibilidades de materiales para las capas de aislamiento diferentes del EPS, como podría ser el XPS, con el objetivo de poder realizar un estudio comparativo y observar cual obtiene unos resultados energéticos mejores.
- Emplear distintas herramientas de certificación energética, además de HULC, como CERMA u otras herramientas europeas, para así tener una comparación de los resultados obtenidos por uno u otro método y observar sus diferencias.
- Realizar un estudio en mayor profundidad de la herramienta de cálculo utilizada (HULC), con la finalidad de observar las ecuaciones y simplificaciones que utiliza este modelo para realizar sus cálculos.
- Analizar cómo se han adaptado los distintos países a las exigencias del Protocolo de Kyoto fuera del ámbito europeo, haciendo especial énfasis en las grandes potencias y las nuevas potencias emergentes.

7. Bibliografía.

- [Abela] A., Abela, M. Hoxley, P., McGrath & S., Goodhew. (2016). An investigation of the appropriateness of current methodologies for energy certification of Mediterranean housing. *Energy and Buildings* 130 210-218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.056>.
- [AFEC] Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. (2015). La Bomba de Calor. Fundamentos, Tecnología y Casos Prácticos. AFEC. ISBN: 978-84-606-5447-6.
- [AGTECNO3] AGTECNO3. (10 de abril de 2023). Aislamiento térmico y eficiencia energética. <https://www.ladrillostecno3.com/aislamiento-termico-y-eficiencia-energetica-2/>.
- [ANAPE] Asociación Nacional de Poliestireno Expandido. (17 de abril de 2023). Reciclado del EPS. <https://anape.es/reciclado/>.
- [Ayuda] Ayuda en Acción. (10 de abril de 2023). ¿Qué es el Acuerdo de París? Objetivos para frenar el cambio climático. <https://ayudaenaccion.org/blog/sostenibilidad/que-es-el-acuerdo-de-paris/>.
- [BASF] Badische Anilin und Soda Fabrik. (2001). Informaciones Técnicas Styropor.
- [DGT] Dirección General de Trabajo. (2023). Resolución de 27 de febrero de 2023, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería; oficinas de estudios técnicos; inspección, supervisión y control técnico y de calidad. *Boletín Oficial del Estado*. CVE: BOE-A-2023-6346.
- [DO] Diario Oficial de la Unión Europea. (2010). Directiva 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios.

[EUCO-a] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2002). Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*. <https://www.boe.es/doue/2003/001/L00065-00071.pdf>.

[EUCO-b] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2010). Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición). *Diario Oficial de la Unión Europea*. <https://www.boe.es/doue/2010/153/L00013-00035.pdf>.

[EUCO-c] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2012). Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea*. <https://www.boe.es/doue/2012/315/L00001-00056.pdf>.

[EUCO-d] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. *Diario Oficial de la Unión Europea*. <https://www.boe.es/doue/2018/156/L00075-00091.pdf>.

[EUMEPS] European Association of Expanded Polystyrene. (17 de Abril de 2023). Sustainability. <https://eumeps.org/sustainability/>.

[femcet] Femcet. (10 de abril de 2023). Objetivos de desarrollo sostenible: que son y Agenda 2030. https://femcet.com/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible-u-ods-que-son-y-agenda-2030/?gclid=Cj0KCQjw_r6hBhDdARIsAMIDhV-8N_-073ElyC23I-tNINNWPxnAPG9IH3V0CaN4diIhPh9wAG7YXH0aAv-YEALw_wcB.

- [Fernández] J., Fernández-Gómez. (2021). Eficiencia energética en el sector industrial. *Orkestra. Instituto Vasco de Competitividad. Fundación Deusto*. ISSN 2340-7638.
- [Forel] Forel. (22 de febrero de 2023). Sistema FOREL. FOREL Sistemas y Proyectos. <https://www.forel.es/>.
- [Galante] A., Galante-Marcos. (2011). Protocolo de Kyoto y desarrollo sostenible. *Cuadernos de Biodiversidad*. N.34. <http://dx.doi.org/10.14198/cdbio.2011.34.03>.
- [Herrando] M., Herrando, D., Cambra, M., Navarro, L., de la Cruz, G., Millán & I., Zabalza. (2016). Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption. *Energy Conversion and Management*. 125 141-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.encoman.2016.04.037>.
- [IDAE-a] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2008). Soluciones de Aislamiento con Poliestireno Expandido (EPS). Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- [IDAE-b] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2015). Calificación de la eficiencia energética de los edificios. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- [Inega] Instituto Enerxético de Galicia. (21 de marzo de 2023). Unidades de conversión. https://www.inega.gal/informacion/diccionario_de_termos/unidades_de_conversion.html?idioma=es.
- [Lakatos] A., Lakatos & F., Kalmár. (2012). Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials. *Building Services Engineering Research Technology*. DOI: 10.1177/0143624412462043.

[López] L. M., López-Ochoa, J., Las-Heras-Casas, L. M., López-González & C., García-Lozano. (2017). Environmental and energy impact of the EPBD in residential buildings in cold Mediterranean zones: The case of Spain. *Energy and Buildings* 150 267-582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.023>.

[mdsocialesa2030-a] Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. (2022). Estrategia de desarrollo sostenible 2030. Un proyecto de país para hacer realidad la agenda 2030. *Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030*. NIPO: 129-21-014-3.

[mdsocialesa2030-b] Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. (10 de abril de 2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible / ODS. <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm>.

[MITECO] Ministerio de *Transición Ecológica* y Reto Demográfico <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx>

[MITMA-a] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Código Técnico de la Edificación. (2022).

[MITMA-b] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2022). Documento Básico HE Ahorro de Energía.

[MITMA-c] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2022). Documento Básico HS Salubridad.

[MITMA-d] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2022). Código Técnico de la Edificación Parte I.

[MITMA-e] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2022). Herramienta Unificada LIDER CALENER v 1.0. Manual de usuario.

[MPR-a] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (1999). Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*.

[MPR-b] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (2007). Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios. *Boletín Oficial del Estado*.

[MV] Ministerio de Vivienda. (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314/con>.

[Odyssee] Odyssee-Mure. (2021). European Union | Energy profile, April 2021. Energy efficiency trends and policies. *Horizon 2020 European Union funding for Research & Innovation*.

[Olasolo] P., Olasolo-Alonso, L. M., López-Ochoa, J., Las-Heras-Casas & L. M., López-González. (2023). Energy Performance of Building Directive implementation in Southern European countries: A review. *Energy and Buildings* 281 112751. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112751>.

[Rey] F.J., Rey-Martínez, E., Velasco-Gómez & J.M., Rey-Hernández. (2018). Eficiencia energética de los edificios. Certificación energética. (1ª edición). *Paraninfo*.

[Rousselot] M., Rousselot & F., Pinto-Da-Rocha. (2021). Energy efficiency trends in buildings in the EU. <https://www.odyssee-mure.eu/publications/policy-brief/buildings-energy-efficiency-trends.pdf>.

[Rodríguez] M., Rodríguez-Pérez. (2021). Guía de aplicación DBHE 2019 Ejemplos (I). Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

[Sánchez] I., Sánchez-Calderón, V., Bernardo, J., Martín-de-León & M.A., Rodríguez-Pérez. (2022). Thermal conductivity of low-density micro-and nanocellular poly (methyl-methacrylate) (PMMA): Experimental and modeling. *Materials & Design* 221 110938. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110938>.

[Semple] S., Semple & D., Jenkins. (2020). Variation of energy performance certificate assessments in the European Union. *Energy Policy* 137 111127. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111127>.

[Turq.] Turqueplast. (2022). Programa de prerrequisitos en industrias.

[Vaquero] P., Vaquero. (2020). Buildings Energy Certification System in Portugal: Ten years later. *Energy Reports* 6 541-547. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.023>.