

David Campoy Díaz

**Modelación energética de edificios integrando
superficies reflectantes y de cambio de fase**

Trabajo Final de Máster

Dirigido por el Dr. Dieter-Thomas Boer

Codirigido por Alba Torres Rivas

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Cubiertas frías.....	3
1.2	Materiales de cambio de fase (PCM)	4
2	Antecedentes	6
3	Metodología	7
3.1	Modelado y simulación de la construcción.....	7
3.2	Estudio de la viabilidad económica y ambiental	8
4	Caso de estudio	10
4.1	Situación geográfica	10
4.2	Estructura de la vivienda.....	10
4.2.1	Cubierta.....	14
4.3	Cargas	14
4.4	Horarios	15
4.4.1	Iluminación y equipos eléctricos.....	16
4.4.2	“Set points” de temperatura	16
4.4.3	Ocupación.....	16
4.4.4	Infiltraciones	17
4.5	Construcciones.....	18
4.5.1	Puentes térmicos, puertas y ventanas.....	18
4.5.2	Paredes exteriores	18
4.5.3	Paredes interiores.....	19
4.5.4	Suelo y entreplantas	19
4.5.5	Cubierta y detalle de los casos de estudio	21
4.6	Materiales.....	24
4.6.1	Material de cambio de fase	25
4.7	Coste económico e impacto medioambiental.....	26
5	Resultados y análisis	28
5.1	Consumo energético mensual.....	28
5.2	Coste económico e impacto medioambiental.....	33
5.3	Perfil de temperatura de la cubierta	38
5.4	Espesor óptimo del XPS	43
5.5	Estudio de sensibilidad del coste del PCM	46
6	Conclusiones	47
7	Referencias	48
8	ANEXOS.....	50
A.1	Tabla climática de Lleida.....	50

A.2 Tablas de "Hotspots" de las viviendas..... 51

1 Introducción

La mejora de la eficiencia energética en edificios es un tema de creciente interés en la actualidad. Debido a que el consumo energético de este sector en referencia al global es de un 30%[1], con el pasar de los años han ido apareciendo nuevas tendencias y tecnologías tratando de ejercer un impacto en el ahorro energético en dicho sector.

Los factores que motivan la aparición de nuevos métodos de ahorro energético son:

- Ahorro en costes económicos.
- Mejora de la sostenibilidad y reducción del impacto medioambiental.

En Catalunya el consumo de energía alcanza cifras muy elevadas debido a la gran actividad industrial que se lleva a cabo en el territorio. Además, si se suma el consumo doméstico dicha cifra aumenta considerablemente. Los datos que se muestran en la tabla 1 obtenidos del "Institut d'Estadística de Catalunya" (IDESCAT), hacen referencia al consumo total doméstico del territorio catalán.

Tabla 1. Consumo energético doméstico total en Cataluña[2]

CONSUMO DOMÉSTICO	2010	2011	2012	2013	2014
Gas natural (ktpe)	1032,8	923,9	913,0	893,8	821,5
Energía eléctrica (ktpe)	973,4	920,5	916,7	881,4	827,1
Otros (ktpe)	384,1	317,3	329,9	327,5	316,0

Tal y como se puede apreciar en la tabla 1, la tendencia del consumo energético de origen doméstico en Cataluña tiende a descender con el transcurrir de los años. La mentalidad, tanto de la ciudadanía como de los organismos públicos y privados, ha cambiado los últimos años, apostando por las nuevas tecnologías y métodos de ahorro energético y con la llegada de la crisis al panorama se han propiciado este cambio de mentalidad.

Para aislar el foco de mayor consumo energético en el ámbito doméstico, es necesario obtener datos sobre cuáles son los consumos habituales en un hogar medio y cuál es su impacto sobre el conjunto. En la figura 1 se observa cada uno de los focos de consumo del hogar junto al porcentaje que representa en cuanto al consumo de energía total en el hogar.

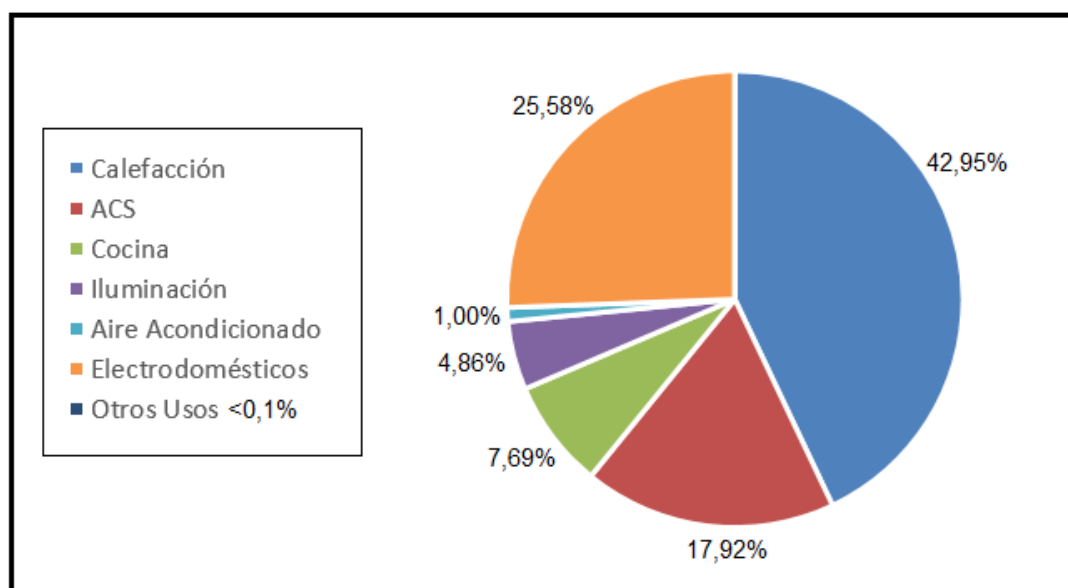


Figura 1. Consumo energético del hogar según su procedencia[3].

Tal y como se puede observar, el consumo energético en un hogar del territorio se ve afectado mayoritariamente por el impacto que ejerce la calefacción en el mismo. Los electrodomésticos y el agua caliente sanitaria pese a tener un impacto importante siguen bastante alejados del impacto de la climatización del hogar.

Dicho motivo es la razón por la cual existen tantos métodos que intentan reducir al máximo el consumo energético en los edificios residenciales. Hay diversos métodos que se implantan hoy en día y que ayudan en gran parte a la reducción del impacto ambiental y al ahorro económico del hogar. Entre ellos cabe destacar:

- Correcta orientación de las edificaciones: mediante un estudio arquitectónico se determina cuál será la orientación óptima de la nueva construcción de acuerdo a las condiciones climáticas y las características del terreno, por ejemplo para aprovechar más horas de sol en zonas frías o evitarlas en zonas trópicas. Este método propicia tanto las corrientes frías que refrescan la estructura en tiempos de calor, como ayuda a que los rayos del sol durante el día calienten el hogar y ayuden a mantener una temperatura más estable en el mismo.
- Utilización de cristal doble tanto en ventanas como ventanales: ayuda a aislar el interior del hogar de la temperatura del exterior y así lograr mantener la temperatura.
- Aislante térmico en las paredes: un correcto aislamiento del hogar permite reducir el uso de la calefacción en invierno y de sistemas de refrigeración en verano.
- Cubiertas frías: este tipo de cubiertas integran un material con un alto índice reflectante en la parte exterior que ayuda a repeler la incisión de la radiación solar en el techo de la vivienda, impidiendo así el recalentamiento de la misma y el consiguiente deterioro[4].
- Materiales de cambio de fase: son materiales muy novedosos de los cuales hoy en día todavía no se ha logrado explotar al cien por cien su potencial, los cuales controlan la temperatura del interior de la edificación mediante la absorción de calor a través del cambio de fase del mismo material[5].

Entre estas y muchas otras metodologías existentes, en el presente documento se procederá al estudio sobre la implantación de las dos últimas metodologías comentadas anteriormente: cubiertas frías y materiales de cambio de fase.

Antes de continuar es interesante aclarar en qué se basan cada una de las dos metodologías que se van a estudiar mediante una breve descripción de las mismas:

1.1 Cubiertas frías

Este tipo de cubiertas también son conocidas como cubiertas termorefectantes o "cool roofs". Su principio básico de funcionamiento se basa en el reflejo del calor solar hacia el exterior de la vivienda evitando así que se transmita hacia el interior del edificio.

Se caracteriza por tener una temperatura de superficie cercana a la temperatura ambiente (entre 30 y 40 grados centígrados menos que una cubierta asfáltica tradicional). Esta diferencia se basa en la gran diferencia que produce dicho material reflectante en el coeficiente de reflexión de las cubiertas. En la figura 2 se muestra una esquematización de la incidencia de los rayos solares en cada uno de los dos tipos de cubiertas (los coeficientes de reflexión y absorción pueden variar mínimamente según la composición y estructura interna de las mismas).

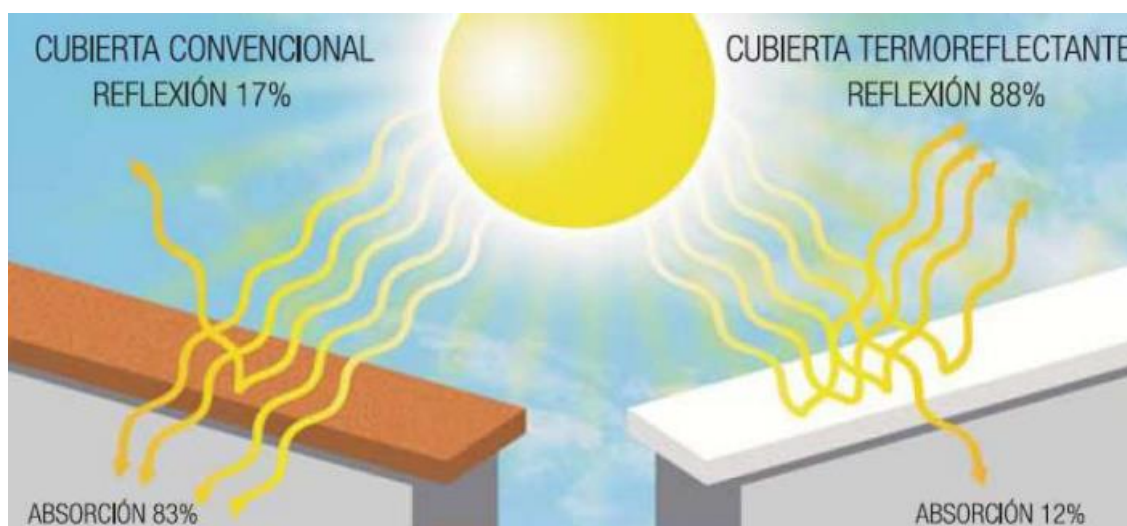


Figura 2. Incisión solar según el tipo de cubierta[6].

Las dos características principales de una cubierta fría se basan en ofrecer:

- Una alta reflectancia solar (capacidad para reflejar la radiación solar), reduciendo así la transferencia de calor hacia el interior del edificio.
- Una alta emitancia térmica (capacidad de liberar el calor absorbido).

Debido a los dos factores principales comentados anteriormente, cualquier edificación que requiera climatización en verano puede salir beneficiada de la instalación de una cubierta fría. Las edificaciones de entre una y tres plantas, con un aislamiento de cubierta insuficiente y que están situados en zonas climáticas cálidas serán los que obtengan unos resultados más significativos.

Paralelamente se debe tener en cuenta que la acción de este tipo de cubiertas es contraproducente cuando el clima es frío, debido a que ejerce de barrera sobre la incidencia de la radiación solar hacia el interior de la edificación, propiciando así un incremento en la demanda de energía de calefacción.

1.2 Materiales de cambio de fase (PCM)

Este tipo de materiales tiene la propiedad de almacenar o liberar grandes cantidades de energía cambiando de fase (sólido ↔ líquido), almacenándola como energía latente. El interés en la implantación de este tipo de materiales en las cubiertas de las edificaciones como método de ahorro energético radica en que, durante el cambio de fase del mismo, la temperatura se mantiene constante mientras que el material absorbe o libera energía. La temperatura de cambio de fase es característica de cada PCM.

Estas características mencionadas les hacen materiales inteligentes ("smart materials") y pasivos, ya que actúan de manera reversible en base a las condiciones térmicas del entorno. La implantación de este tipo de materiales como método de ahorro energético en edificios se encuentra todavía bajo investigación debido a que la explotación y el aprovechamiento total de este tipo de materiales para ese fin es muy amplio.

Las prestaciones de las que disponen este tipo de materiales son las de termorregulador, que permite reducir las oscilaciones térmicas de un espacio. Con esto se logra reducir la dependencia de los sistemas de climatización convencionales y por lo tanto supone un ahorro energético.

Para poder emplear este tipo de materiales en las diferentes aplicaciones, es necesario realizar un encapsulado del PCM con la finalidad de evitar pérdidas del mismo cuando el material cambie de fase (cambio a fase líquida). Existen principalmente dos posibilidades: macroencapsulado y microencapsulado.

La finalidad del presente estudio no se centra en el estudio de las propiedades individuales de los materiales de cambio de fase, por lo tanto no se entrará a especificar las características de cada uno de los tipos de encapsulados del material. Aun así, en la figura 3 se muestra una esquematización del principio de funcionamiento de los materiales de cambio de fase.

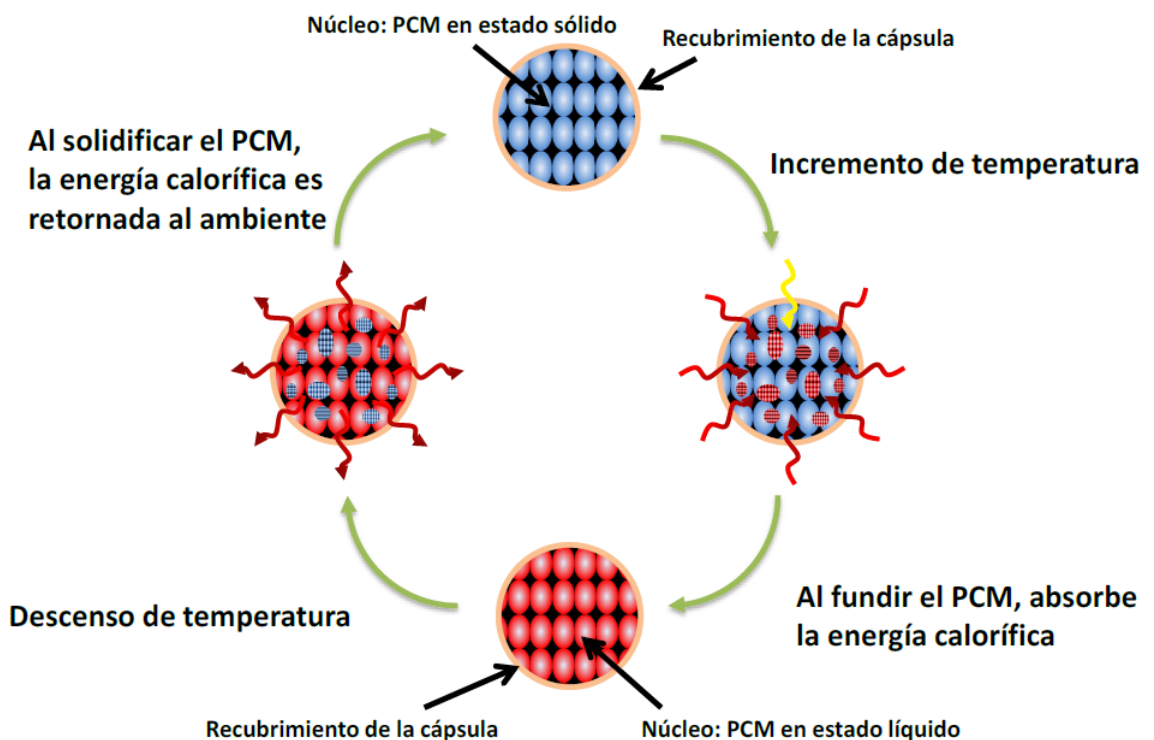


Figura 3. Esquemmatización del funcionamiento de los materiales de cambio de fase encapsulados[7].

El objetivo de este proyecto se basa en el análisis de la integración de superficies reflectantes con o sin la combinación de materiales de cambio de fase en la remodelación de cubiertas de viviendas ya existentes, así como la implementación por separado de PCM o aislantes, a fin de reducir el consumo energético y minimizar el impacto medioambiental y económico que producen las mismas.

2 Antecedentes

Son numerosos los estudios que se han ido realizando (y se continúan haciendo) sobre la optimización energética en edificios. Uno de los muchos estudios que se han llevado a cabo es el realizado por Serrano [8] en el que se realiza un estudio sobre la metodología de calificación energética de edificios residenciales para intentar minimizar el consumo energético en estos, identificando el aislamiento de los muros exteriores y de la cubierta, la supresión de los puentes térmicos y la ventilación controlada de la vivienda como puntos clave sobre los que actuar..

Debido a la creciente necesidad de los últimos años en cuanto a ahorro energético, han surgido un gran número de metodologías y materiales que aportan una gran mejora en el tema. Muchos de ellos todavía están en fase experimental o su implantación está todavía bajo estudio.

Este es el caso de los materiales de cambio de fase, de los cuales durante los últimos años se han realizado estudios experimentales sobre la efectividad y propiedades de los mismos en el ámbito del ahorro energético. Como ejemplo, el artículo realizado por Mazo et al. [9] con la aplicación de ingeniería térmica. Trata sobre el análisis sensitivo experimental de las propiedades termofísicas de los materiales de cambio de fase implantados en un pequeño cubículo de laboratorio para encaminar su uso en edificación.

También son muchos los estudios sobre diferentes composiciones de estos materiales, en los cuales se estudian los diferentes puntos de cambio de fase, así como las curvas de entalpía en función de la temperatura de dichos materiales. Concretamente, el artículo de Lázaro et al. [10] trata sobre los métodos de análisis térmico de los materiales de cambio de fase y comenta varios resultados obtenidos de los estudios experimentales realizados, destacando la alta sensibilidad de la temperatura de cambio de fase en función de las composiciones y concentraciones de los componentes que lo forman.

En cuanto a la implementación de materiales reflectantes en las cubiertas, hay numerosos artículos como el realizado por Al-Obaidi et al. [11] donde se estudia su beneficio en función del tipo de climatología de la zona geográfica en la que se halle la edificación. Esto es debido a que esta medida de ahorro energético llega a ser contraproducente en zonas de climas fríos, donde la acción de los rayos solares sobre las cubiertas de las viviendas ayude a calentarlas y debido a la instalación de materiales reflectantes se evite este calentamiento natural.

3 Metodología

3.1 Modelado y simulación de la construcción

Para poder obtener los resultados de las diferentes simulaciones con las metodologías de ahorro energético comentadas anteriormente, ha sido necesario realizar un modelo previo y determinar todas las características del mismo (dimensiones, materiales, distribución interna, etc.). En la realización de este proyecto se han utilizado un conjunto de programas informáticos que han facilitado la obtención y lectura de los resultados obtenidos:

- SketchUp [12].
- OpenStudio [13].
- EnergyPlus [14].
- jEPlus [15].

Para la creación del modelo base de la vivienda sometida a estudio junto a su distribución interior, se ha utilizado el programa de modelado en 3D SketchUp.

Con la ayuda de este programa se ha dimensionado la edificación y se han colocado todas las aperturas necesarias para puertas, ventanas y ventanales. Además, se ha procedido a distribuir internamente el espacio de la vivienda en diferentes habitaciones, a las cuales se les ha asignado una zona térmica independiente a cada una de ellas, diferenciándolas entre sí según la planta en la que se encuentren. También se han tenido que determinar los puentes térmicos del forjado y los de contornos de huecos. En el apartado 5.1 de este documento se especifica más claramente la edificación que se ha modelado.

Una vez realizado el modelo en 3D de la vivienda se procede a determinar todas las especificaciones necesarias para la simulación final. Para ello, se utilizará el programa OpenStudio en el cual se llevarán a cabo las siguientes acciones:

- Determinación de todos los materiales necesarios y especificaciones de cada uno de ellos.
- Creación de las construcciones (techo, paredes interiores, paredes exteriores, ventanas, etc.) del modelo mediante su composición de materiales.
- Añadir el fichero climático[16] de la zona donde se va a realizar la simulación (en este caso la provincia de Lleida).
- Determinar las cargas internas de la vivienda que se quieran tener en cuenta.
- Establecer los horarios ("schedules") de todos los parámetros que se quieran tener en cuenta a la hora de realizar la posterior simulación.
- Determinación de las infiltraciones y flujos de energía entre el interior y el exterior de la vivienda.
- Agrupar cada zona térmica con sus correspondientes cargas y horarios.
- Asociar cada uno de los elementos modelados en 3D mediante SketchUp a las construcciones creadas en OpenStudio.

Todas y cada una de las acciones comentadas anteriormente se ven con mayor detalle y especificación en los apartados 5.2 – 5.5 del presente documento.

Una vez se han introducido todos los datos anteriores se procede a utilizar el software de simulación EnergyPlus, el cual es capaz de calcular diferentes mecanismos de transferencia de calor entre muchas otras utilidades del mismo. Debido a que en este proyecto sólo se va a proceder a calcular la viabilidad de los métodos a estudiar según la eficiencia energética y el impacto medioambiental y económico de los mismos, sólo se tendrán en cuenta los mecanismos de cálculo de transferencia de calor que ofrece EnergyPlus: conducción, convección y radiación. Además, es necesario utilizar este software de simulación para poder añadir el PCM en la categoría de materiales de cambio de fase.

Finalmente, para obtener los resultados de la simulación es necesario seleccionar cuáles serán las variables de salida ("outputs") que el software calcule. En este caso, se basará el estudio en la demanda de calor y de frío en diferentes épocas del año, ya sea de manera anual, mensual, o según el momento del día.

Para ampliar el rango de resultados y poder realizarlo de manera más cómoda y rápida, se utilizará el software de simulación paramétrica jEPlus. Con la ayuda de este software se puede vincular un parámetro de entrada del sistema a una variable y darle un rango de valores determinado. En este caso, se ha especificado que el poliestireno extruido utilizado como aislante en alguno de los casos de estudio que se verán más adelante tenga un rango de espesor de entre 0,04 y 0,2 metros con un intervalo de 0,01 entre cada valor. De esta forma, este software permite que con una sola simulación se obtengan los datos para un número determinado de datos de entrada sin tener que realizar una simulación individual para cada uno de ellos.

En la figura 4 se muestra una esquematización de la interacción que se lleva a cabo entre EnergyPlus y jEPlus para llevar a cabo las simulaciones.

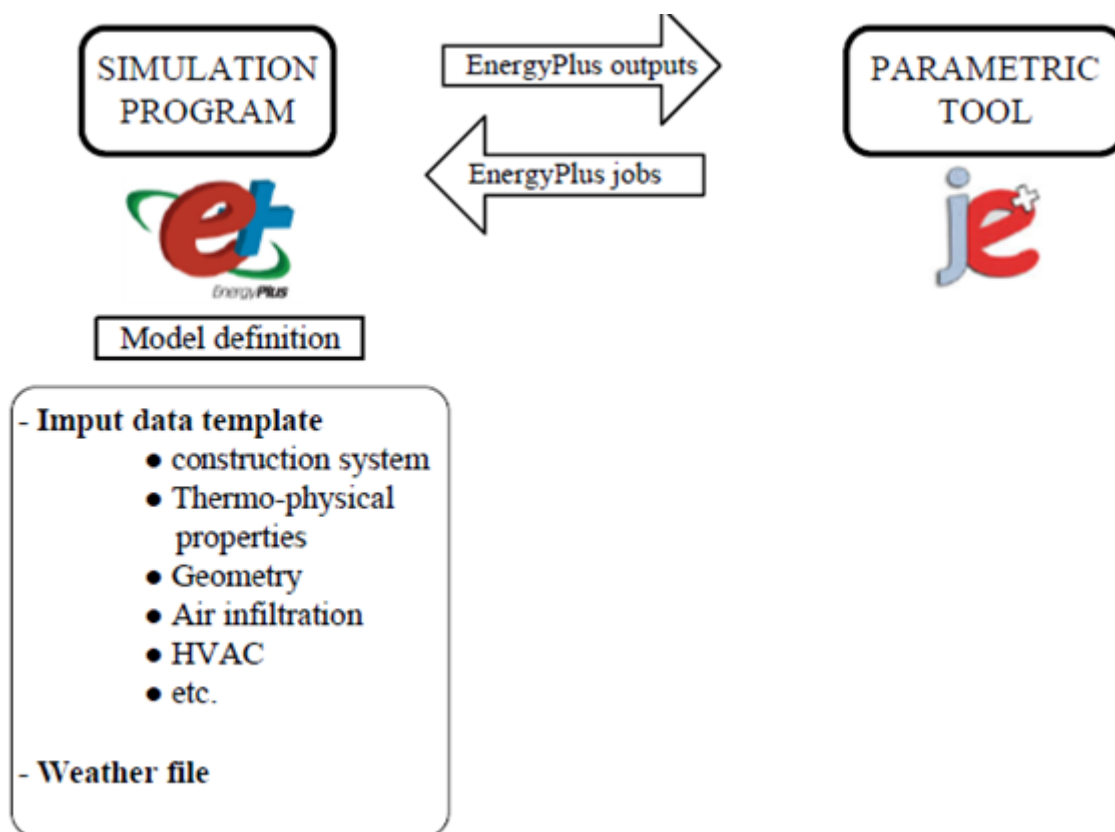


Figura 4. Esquema de proceso entre la dualidad EnergyPlus y jEPlus[17].

3.2 Estudio de la viabilidad económica y ambiental

La comparativa entre las diferentes opciones de ahorro energético implantadas sobre el modelo, se realizará en base a tres factores determinantes: consumo energético para la climatización de la vivienda, coste económico e impacto ambiental. Los datos del impacto ambiental de los materiales han sido obtenidos de la base de datos de "ecoinvent" cuya versión es la 3.2 del año 2015.

El estudio económico constará del coste de materiales y la mano de obra de implantación de los mismos[18], así como del coste económico de la climatización durante la vida útil de la metodología, contando un incremento anual del 5%.

$$CTm = \sum Mmi * Cmi \quad (1)$$

$$CTe = E * Ce + I * Av \quad (2)$$

$$CT = CTm + CTe \quad (3)$$

Donde:

CTm= coste total materiales (€).

Mmi= masa de cada material (kg).

Cmi= coste de cada material (€).

CTe= coste total eléctrico (€).

E= consumo eléctrico (kWh)

Ce= coste eléctrico (€/kWh)

I= incremento 5% anual

Av= años de vida útil

CT= coste total (€)

Por otro lado, el impacto ambiental se ha cuantificado con la suma total del impacto de los diferentes materiales así como del impacto producido por la generación de la electricidad del mix eléctrico español, dichos impactos se suponen constantes durante todo el ciclo de vida.

$$It = \sum Mmi * Imi + Ce * Im * Av \quad (4)$$

Donde:

It= impacto total (puntos).

Imi= impacto de cada material (puntos).

Ce= consumo eléctrico anual (kWh).

Im= impacto mix (puntos).

Cabe destacar que se ha tomado como referencia un COP de 3 referente a los equipos climáticos de la vivienda.

4 Caso de estudio

4.1 Situación geográfica

La vivienda tipo que se va a someter a estudio está situada en la provincia de Lleida. Dicha provincia se localiza en la parte oeste de Cataluña, con una superficie de 12173 km². Al norte limita con Francia y Andorra; al este con las provincias de Girona, Barcelona y Tarragona; al sur con las provincias de Tarragona y Zaragoza y al oeste con la provincia de Huesca.

En la figura 5 se muestra la situación de la provincia de Lleida en el territorio español.



Figura 5. Localización provincia Lleida en España[19].

La razón por la cual se ha determinado realizar el estudio en esta zona geográfica ha sido la extrema climatología que presenta el territorio (las temperaturas medias varían durante el año en 19,2°C), teniendo mínimas en invierno bastante considerables y máximas en verano relativamente altas. En la tabla A.1 del anexo de este documento se muestra la tabla climática según datos históricos de la provincia de Lleida [20]. Los datos han sido obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

4.2 Estructura de la vivienda

El modelo propuesto para la simulación energética de este estudio es una vivienda unifamiliar aislada de dos plantas. La elección de este modelo se ha realizado en base al estudio de Cuchí y Sweatman [21]. El análisis de este estudio determina mediante los "hotspots" que aparecen en las tablas del anexo A.2 de este documento, las mayores agrupaciones transversales según el tipo de vivienda en España. Tal y como se puede observar en la tabla comentada anteriormente, las viviendas unifamiliares de 2 plantas ubicadas en entornos rurales/aislados son las que tienen mayor presencia en el panorama nacional. Por este motivo el presente estudio se ha centrado en la modelización y posterior estudio de una vivienda con las características comentadas.

En las figuras 6 y 7 se muestran los planos de la distribución interna de la primera y la segunda planta de la vivienda respectivamente.



Figura 6. Distribución interna planta baja [22].

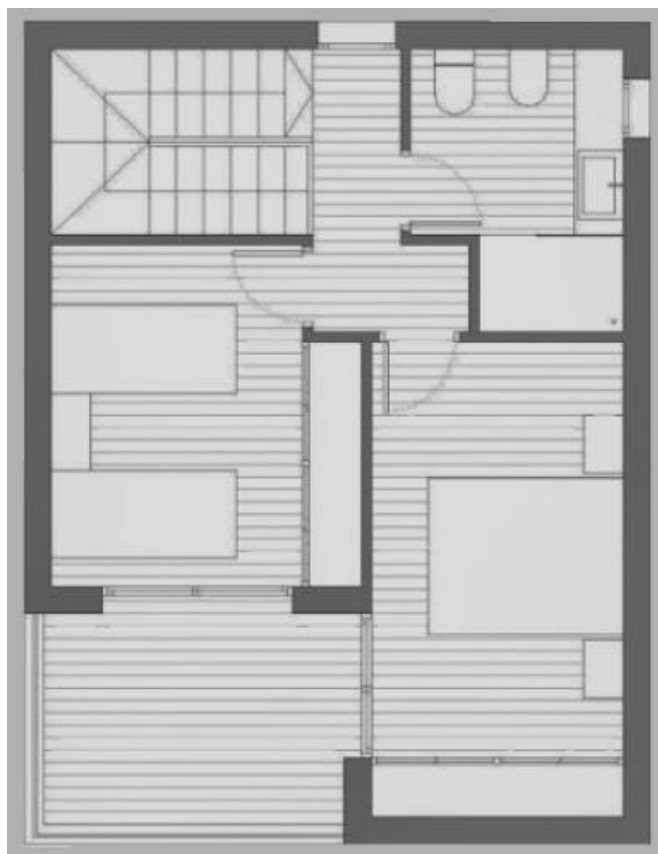


Figura 7. Distribución interna segunda planta [22].

Tal y como se puede observar, la vivienda dispone de dos cuartos de baño, uno en cada planta, una cocina y una sala de estar en la planta baja y dos dormitorios en la segunda planta, los cuales para modelizar y simular el caso se unen como una misma superficie y una misma zona térmica. Por lo tanto se pueden determinar 5 zonas térmicas diferenciadas.

En cuanto a las dimensiones de la edificación, cada planta mide 6,45 metros de ancho por 8,45 metros de fachada principal; lo que hace una superficie total de planta de 54,50 m². La superficie total habitable es de 94 m² ocupando cada planta 47 m². Cada piso tiene una altura de 2,80 metros, haciendo así una altura total de la edificación de 5,60 metros.

En las figuras 8 y 9 se muestran las dos orientaciones de la vivienda mediante SketchUp que permiten visualizar el exterior del modelo 3D al completo.

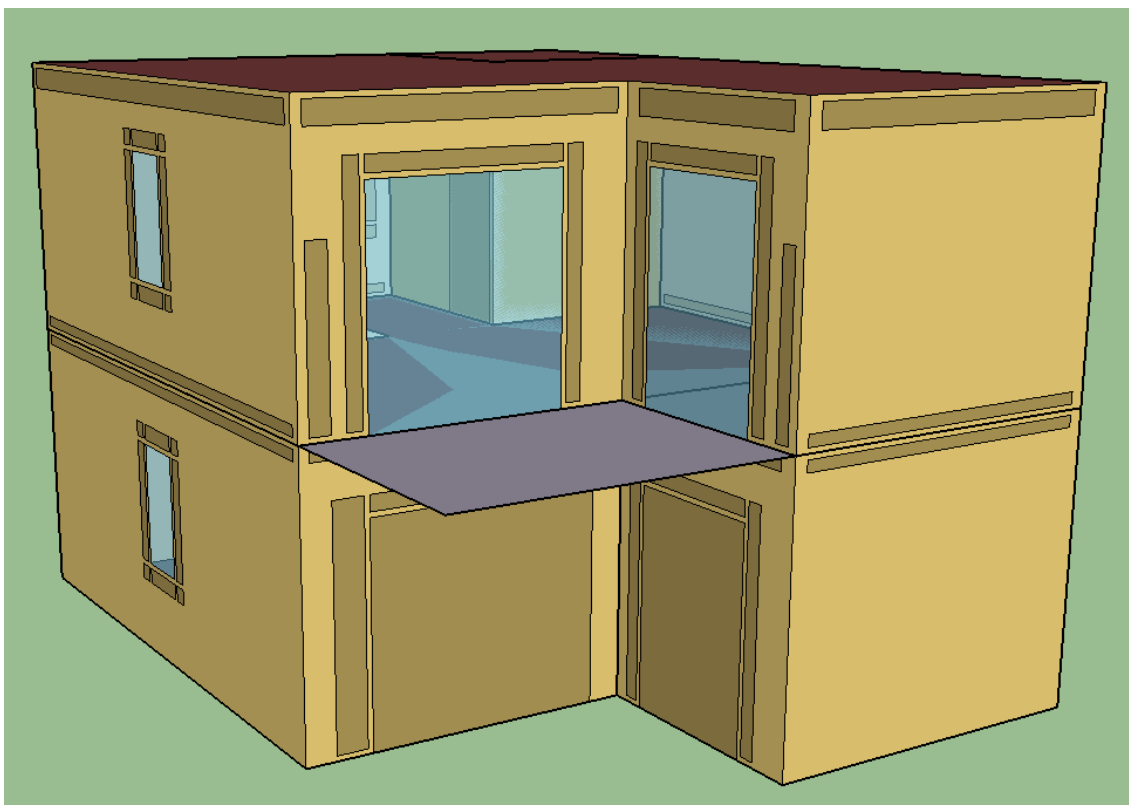


Figura 8. Vista exterior 1 de la vivienda modelo SketchUp

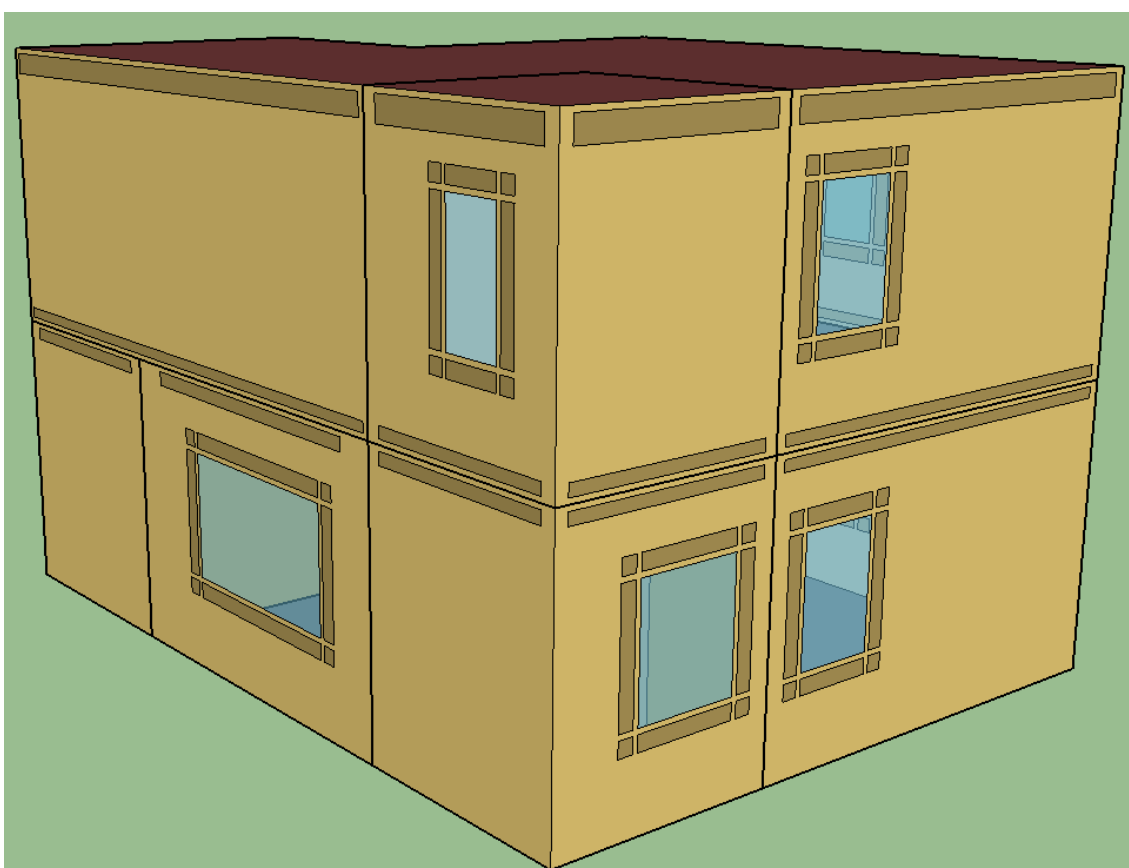


Figura 9. Vista exterior 2 de la vivienda modelo SketchUp

En las dos figuras anteriores se aprecia que el tipo de cubierta que se ha modelizado en SketchUp es de tipo plano.

4.2.1 Cubierta

El tema de estudio se centra en la rehabilitación de la cubierta de este tipo de viviendas mediante la implantación de una cubierta de tipo plana invertida; teniendo en cuenta la posible integración de elementos reflectantes y/o materiales de cambio de fase en la misma. En la figura 10 se muestra la estructura de la cubierta plana que se deberá rehabilitar y las posibles opciones de implementación de ahorro energético que se estudiarán.

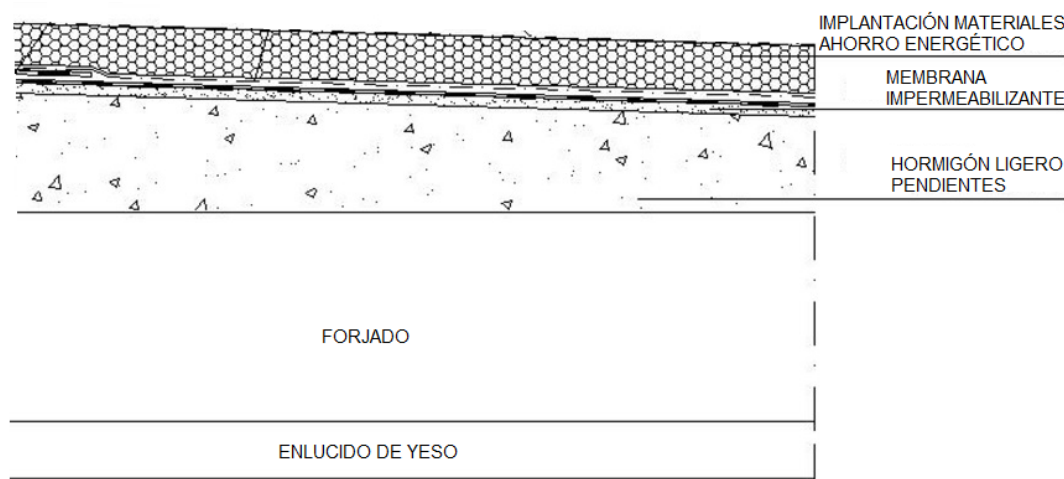


Figura 10. Estructura cubierta plana con posible adecuación a plana invertida[23].

Tanto las especificaciones de los materiales de la cubierta plana existente, como las de los materiales estructurales de la vivienda se muestran detalladas en los apartados 5.4 y 5.5 del presente documento.

La diferencia entre una cubierta plana invertida y una convencional se basa en el cambio de la posición del material aislante y la membrana impermeabilizante. Dicho cambio propicia el conjunto de ventajas siguientes:

- Se reduce el choque térmico sobre la membrana impermeabilizante.
- Disminución de los picos de temperatura máximos sobre la membrana.
- Permite que la membrana actúe como barrera contra el vapor.
- Facilita la disposición de múltiples acabados (transitables, no transitables, ajardinados, etc.)

Debido a que el presente estudio se centra estrictamente en el impacto en el consumo energético del hogar sin tener en cuenta parámetros tales como confort (humedad), etc, el sistema (como se observará más adelante) se simplificará sin tener en cuenta el acabado externo no transitable ni la membrana impermeabilizante.

4.3 Cargas

Las cargas necesarias que deben estar presentes en el sistema para que la simulación se realice correctamente son las siguientes:

- El número de personas y su correspondiente actividad.
- Las luces.
- Los equipos.

La actividad física que generan los ocupantes en el interior de la vivienda genera un efecto térmico en el ambiente que es importante tenerlo en cuenta para realizar una correcta simulación del caso sometido a estudio.

Para ello, ha sido necesario realizar dicho cálculo mediante datos que relacionan la tasa metabólica por unidad de superficie cutánea con el tipo de actividad que se lleve a cabo en cada una de las habitaciones de la vivienda o zonas térmicas. Los datos se han obtenido de estudios de la Universidad Complutense de Madrid.

En la tabla 2 se muestra la relación entre las diferentes actividades y sus correspondientes tasas metabólicas.

Tabla 2. Relación actividad – Tasa metabólica (W/m²) [24].

Actividad	Tasa metabólica por unidad de superficie cutánea (W/m ²)
Recostado	46
Sentado, descansando	58
Parado, relajado	70
Actividad sedentaria	70
Actividad de pie	116
Actividad media	165
Actividad deportiva	400

Según el estudio comentado anteriormente, se debe tener en cuenta una superficie cutánea media por habitante de 1,82 m². Así pues, en la tabla 3 se muestra el cálculo de la actividad en función de cada zona térmica de la vivienda.

Tabla 3. Cálculo actividad por zona térmica.

Habitación	Actividad	Tasa metabólica(W/m ²)	Tasa metabólica (W/pers)
Dormitorios	Recostado	46	75
Lavabos	Parado, relajado	70	130
Salón	Sentado descansando	58	105
Cocina	Actividad de pie (trabajo doméstico)	116	210

El número de habitantes de la vivienda se estipula en 4 debido a que como se ha comentado anteriormente, la vivienda dispone de dos dormitorios dobles.

El resto de cargas corresponden a los valores asociados a las cargas propuestas por el Código técnico de la Edificación en el Documento Básico HE de Ahorro de Energía[25]. Dichos valores son los respectivos a los máximos anuales de cada una de las cargas. En la tabla 4 se muestran los valores de las cargas obtenidos.

Tabla 4. Valor máximo por carga [25].

Carga	Valor	Unidad
Luces	2,2	W/m ²
Equipos eléctricos	2,2	W/m ²

4.4 Horarios

Para que la simulación pueda ser realizada, es necesario que se estipulen los horarios de los diferentes factores que intervendrán en la misma:

- Iluminación.
- Equipos.
- "Set points" de temperaturas mensuales.
- Ocupación según la zona térmica.
- Actividad por cada zona térmica de la vivienda.
- Infiltraciones de aire.

4.4.1 Iluminación y equipos eléctricos

Para obtener los datos necesarios para la realización de los horarios, se ha recurrido a extraer los datos de los perfiles de uso residencial del Código técnico de la Edificación.

En la figura 11 se muestran los perfiles normalizados de uso residencial en España, con una densidad de fuente interna baja y un periodo de utilización de 24 horas.

USO RESIDENCIAL	(24h, BAJA)				
	1-7	8	9-15	16-23	24
Iluminación (W/m²)					
Laboral, Sábado y Festivo	0,44	1,32	1,32	1,32	2,2
Equipos (W/m²)					
Laboral, Sábado y Festivo	0,44	1,32	1,32	1,32	2,2

Figura 11. Perfiles normalizados de uso residencial [25].

4.4.2 "Set points" de temperatura

Para determinar el perfil de "set point" de temperatura de la vivienda se ha recurrido a la propuesta que realiza el Código técnico de Edificación. En la figura 12 se muestran los datos que se han utilizado en la simulación del modelo propuesto.

USO RESIDENCIAL	(24h, BAJA)				
	1-7	8	9-15	16-23	24
Temp Consigna Alta (°C)					
Enero a Mayo	-	-	-	-	-
Junio a Septiembre	27	-	-	25	27
Octubre a Diciembre	-	-	-	-	-
Temp Consigna Baja (°C)					
Enero a Mayo	17	20	20	20	17
Junio a Septiembre	-	-	-	-	-
Octubre a Diciembre	17	20	20	20	17

Figura 12. Perfiles normalizados del "set point" de temperatura [25].

4.4.3 Ocupación

Otro de los parámetros necesarios para realizar la simulación del caso presentado es el de la ocupación según la zona térmica de la vivienda.

Teniendo en cuenta que el número de habitantes se ha estipulado en 4 (como ya se ha comentado anteriormente), es necesario determinar la ocupación horaria de cada una de las habitaciones según el día de la semana. Para ello se ha realizado una hipótesis de la ocupación que se presupone en la vivienda, la cual se muestra en la tabla 5 de a continuación:

Tabla 5. Hipótesis de ocupación por zona térmica.

		00:00-6:59h	7:00h-15:59h	16:00h-22:59h	23:00h-23:59h
Dorm.	Lun-Viern	3,2	0,5	1,5	3
	Festivos	1,7	1	0,7	1
Lavabos	Lun-Viern	0,5	1	1	0,5
	Festivos	0,6	0,6	0,8	0,6
Salón	Lun-Viern	0,1	1,5	1	0,4
	Festivos	1,2	1,4	1,5	2
Cocina	Lun-Viern	0,2	1	0,5	0,1
	Festivos	0,5	1	1	0,4

Cabe destacar que para la conformación de la tabla 5 no se han tenido en cuenta los periodos de vacaciones en que la vivienda esté desocupada, sino que se ha realizado en base a una ocupación homogénea durante todo el año.

Finalmente, se ha procedido a incorporar los datos de la tabla anterior como datos de tipo fraccional dentro de cada sector de ocupación de la zona térmica correspondiente.

4.4.4 Infiltraciones

Para realizar el cálculo de las infiltraciones en la vivienda se ha recurrido a seguir el método de cálculo estipulado por el Código técnico de Edificación en el Documento Básico HS de Salubridad. Se basa en realizar el cálculo de las renovaciones de aire que tienen lugar en la vivienda e interpretarlas como un dato fraccional en el diseño del horario de las mismas.

En la tabla 6 que aparece a continuación se observa el caudal de ventilación mínimo exigido por cada tipo de zona térmica.

Tabla 6. Ventilación mínima exigida por zona térmica[26].

Zona térmica	Caudal ventilación mínimo exigido (l/s)		
	Por ocupante	Por m² útil	Otros parámetros
Dormitorios	5	-	-
Salón	3	-	-
Lavabos	-	-	15 por zona térmica
Cocina	-	2	50 por zona térmica

Primeramente debe calcularse el caudal de ventilación total de la vivienda. Teniendo en cuenta la tabla anterior, siendo 4 el número de ocupantes de la vivienda, una superficie de cocina de 7,6m² y que no se han instalado sistemas de ventilación adicionales ni en los lavabos ni en la cocina, mediante la expresión (5) se obtiene el caudal de ventilación (q_v) en l/s.

$$q_v(l/s) = (5 \times 4) + (3 \times 4) + (2 \times 7,6) = 47,2 \quad (5)$$

A continuación, para obtener el valor de las renovaciones por hora que tienen lugar en la vivienda se procede a utilizar la expresión (6) mostrada a continuación, teniendo en cuenta que las unidades del caudal de ventilación (q_v) son m³/h y que consecuentemente el volumen total de la vivienda (V) se expresa en m³.

$$\frac{\text{Renovaciones}}{\text{hora}} = \frac{q_v}{V} = \frac{163}{263,10} = 0,62 \quad (6)$$

Finalmente se procede a añadir el valor de infiltraciones en el software de simulación con un valor constante a lo largo de todo el día.

4.5 Construcciones

En el presente apartado, se especificarán cada uno de los elementos estructurales de la vivienda y su composición material. Todos los datos mostrados a continuación han sido extraídos del Catálogo de Elementos Constructivos del Código técnico de la Edificación.

4.5.1 Puentes térmicos, puertas y ventanas

Según el Código Técnico, un puente térmico es la zona térmica del edificio en la que se evidencia una variación de la uniformidad de la construcción y que conlleva una minoración de la resistencia térmica respecto al resto del cerramiento de la vivienda.

Se ha recurrido al código técnico para poder determinar qué tipo de material debería determinar la composición de los puentes térmicos. Debido a que los marcos de las ventanas y de las puertas de la vivienda estudiada son de madera (material que difiere del resto del cerramiento de la misma), cumpliendo con el código, la variación de la uniformidad de la construcción debido a un cambio de material en la composición del cerramiento determina las propiedades del puente térmico, tanto los referentes a cerramientos como los respectivos al primer piso y al tejado [27]. En este caso tal y como se muestra en la tabla 7, se ha determinado que la hipotética composición de los puentes térmicos, y por lo tanto sus propiedades, son las de la madera de roble.

Tabla 7. Material puentes, puertas y ventanas [27].

Elemento	Material	Espesor (m)
Puente térmico	Madera de roble	0,325
Puertas	Madera de roble	0,07
Ventanas	Vidrio sencillo	0,006

4.5.2 Paredes exteriores

Las paredes que conforman el cerramiento perimetral de la vivienda carecen de aislamiento explícito, pero como ya se ha comentado anteriormente el presente estudio se centra en la implementación de medidas de ahorro energético en la cubierta de la vivienda, pasando por alto la ineficiencia de otras zonas de la construcción.

En la figura 13 se muestra esquemáticamente la composición estructural de las paredes exteriores del modelo; la tabla 8 concreta el espesor de cada uno de ellos.

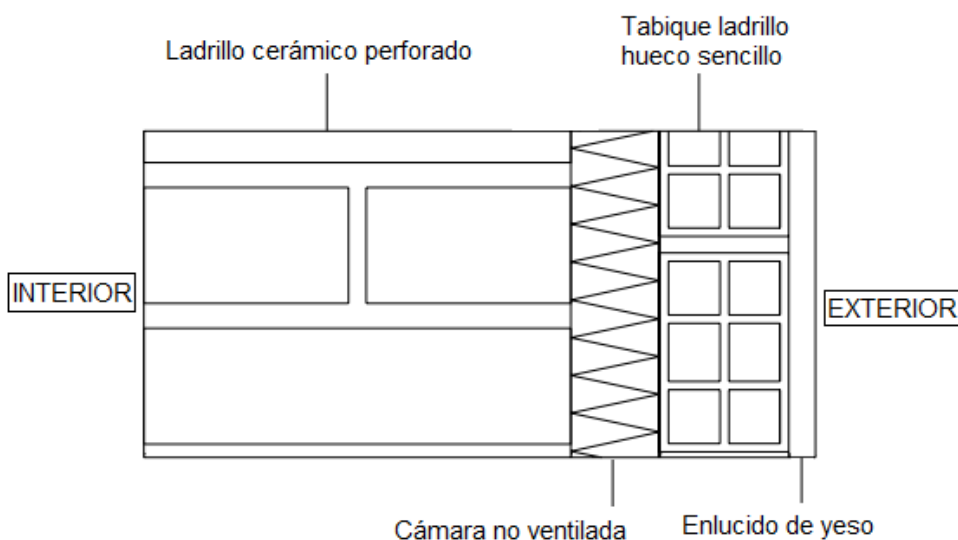


Figura 13. Estructura interna pared exterior [27].

Tabla 8. Materiales paredes exteriores [27].

Elemento	Material	Espesor (m)
Paredes exteriores	Ladrillo cerámico perforado	0,24
	Cámara no ventilada	0,03
	Tabique ladrillo hueco sencillo	0,04
	Enlucido de yeso	0,015

4.5.3 Paredes interiores

Las paredes que delimitan cada una de las zonas térmicas dentro de una misma planta de la edificación son las que se denominan como interiores.

En la figura 14 se muestra esquemáticamente la composición estructural y en la tabla 9 se concreta el espesor de cada material.

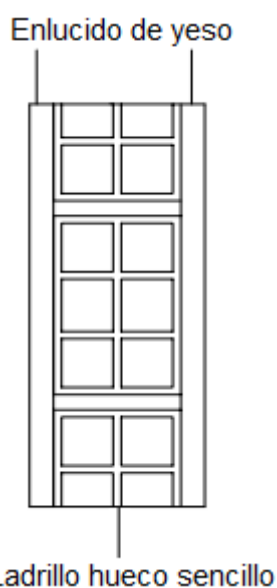


Figura 14. Estructura interna pared interior [27].

Tabla 9. Materiales paredes interiores [27].

Elemento	Material	Espesor (m)
Paredes exteriores	Enlucido de yeso	0,015
	Ladrillo hueco sencillo	0,04
	Enlucido de yeso	0,015

4.5.4 Suelo y entreplantas

Se determina que el suelo que hará de base a la construcción estará conformado sólo por los materiales propios de la construcción.

En la figura 15 se observa la estructura del suelo base y en la tabla 10 se concreta el espesor de los materiales utilizados.

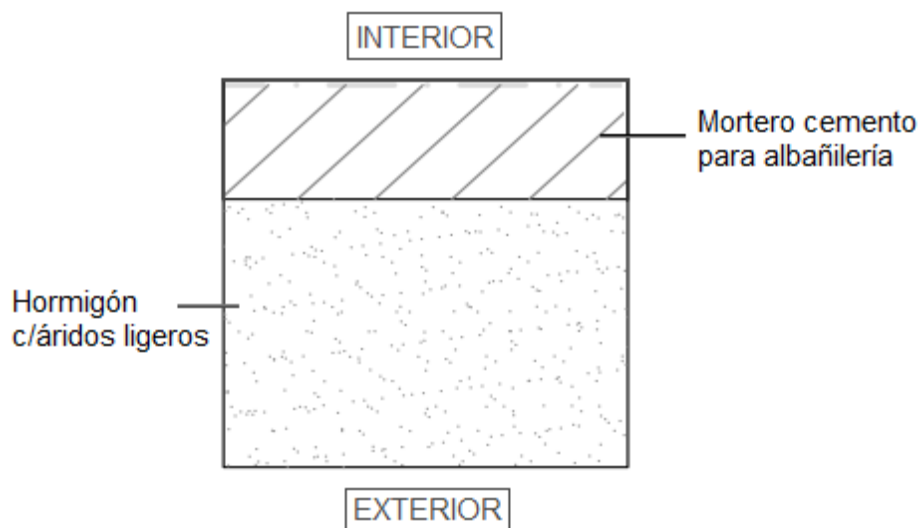


Figura 15. Estructura interna suelo base.

Tabla 10. Materiales suelo base [27].

Elemento	Material	Espesor (m)
Suelo base	Hormigón c/áridos ligeros	0,25
	Mortero de cemento para albañilería	0,04

En cuanto a la estructura del techo de la planta baja y consecuentemente el suelo de la segunda planta, en la figura 16 muestra los materiales que la conforman y en la tabla 11 se especifican los espesores.

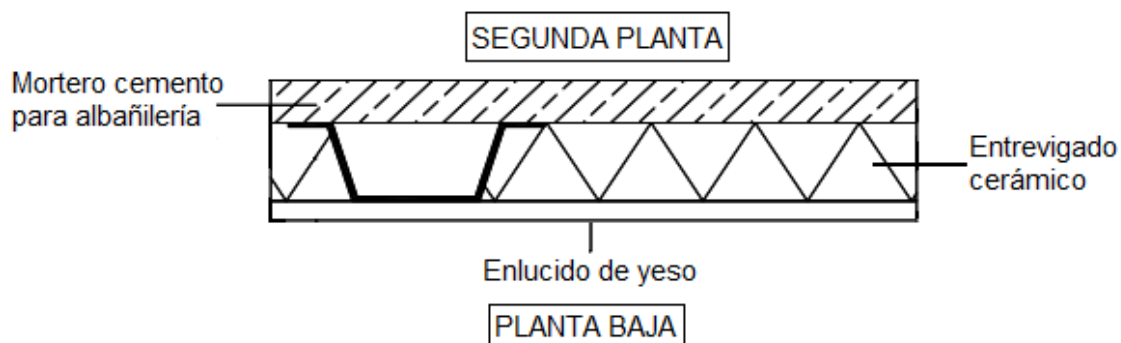


Figura 16. Estructura interna entreplantas.

Tabla 11. Materiales entreplantas [27].

Elemento	Material	Espesor (m)
Entreplantas	Enlucido de yeso	0,015
	Entrevigado cerámico	0,25
	Mortero de cemento para albañilería	0,04

4.5.5 Cubierta y detalle de los casos de estudio

Se han realizado diversas simulaciones con distintas configuraciones de cubierta a fin de estudiar y cuantificar el impacto en el ahorro energético, económico y medioambiental que tiene cada una de ellas sobre el modelo en el territorio sometido a estudio:

- Caso base. (Fig.17)
- Material de cambio de fase en la superficie. (Fig.18)
- Material reflectante como capa superior. (Fig.19)
- Aislamiento externo. (Fig.20)
- Material de cambio de fase en el interior y aislante como capa superior (Fig.21)
- Material aislante en el interior y material de cambio de fase en el exterior (Fig.22)
- Material reflectante junto a aislante en la parte superior de la construcción. (Fig.23)
- Material reflectante, aislante y cambio de fase en orden de externo a interno sobre la superficie del lecho. (Fig.24)
- Material reflectante, cambio de fase y aislante en orden de externo a interno sobre la cubierta existente. (Fig.25)

A continuación se muestran un seguido de figuras que muestran de una manera más visual cómo se estructura cada una de las configuraciones que han sido sometidas a estudio.

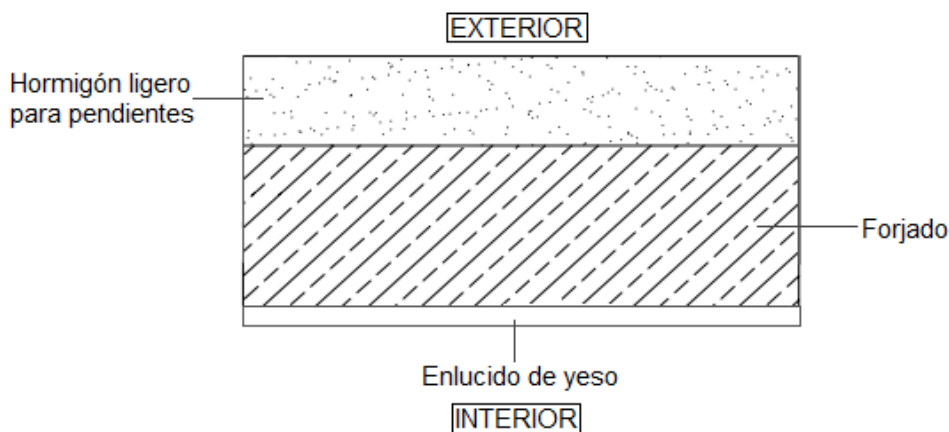


Figura 17. Estructura caso base.

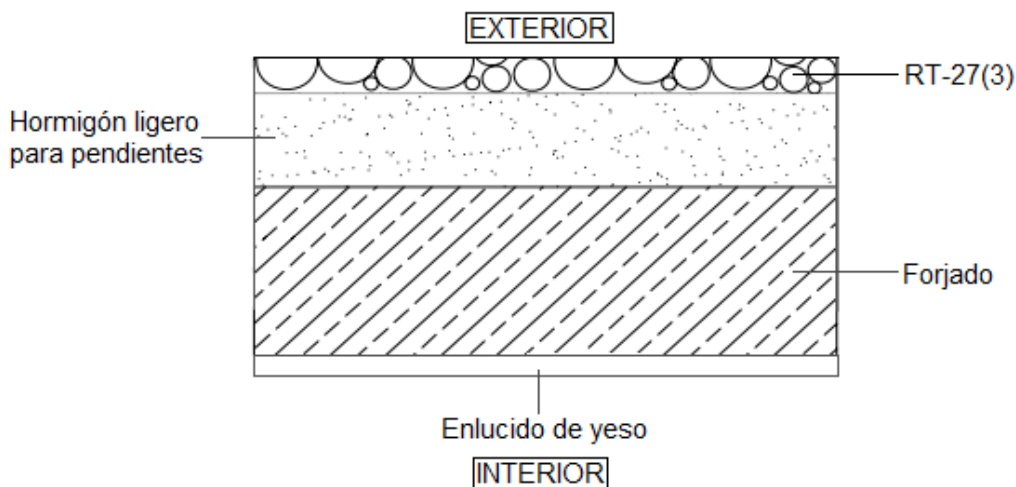


Figura 18. Estructura material cambio de fase en la superficie.

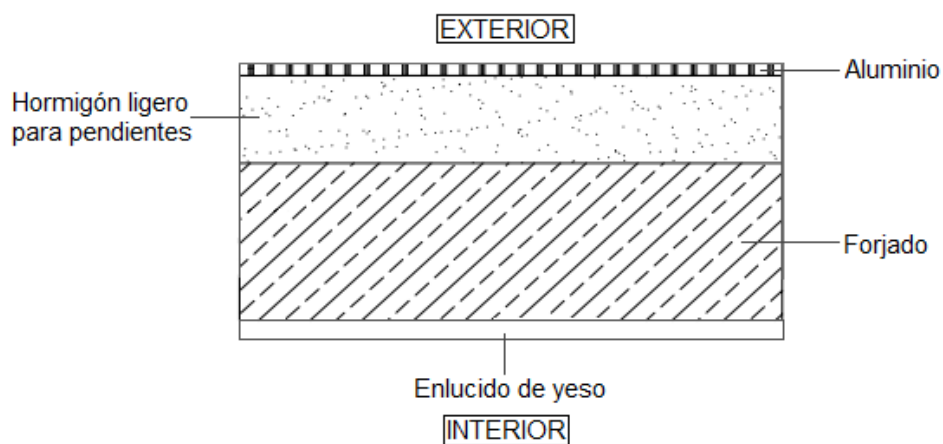


Figura 19. Estructura material reflectante como capa superior.

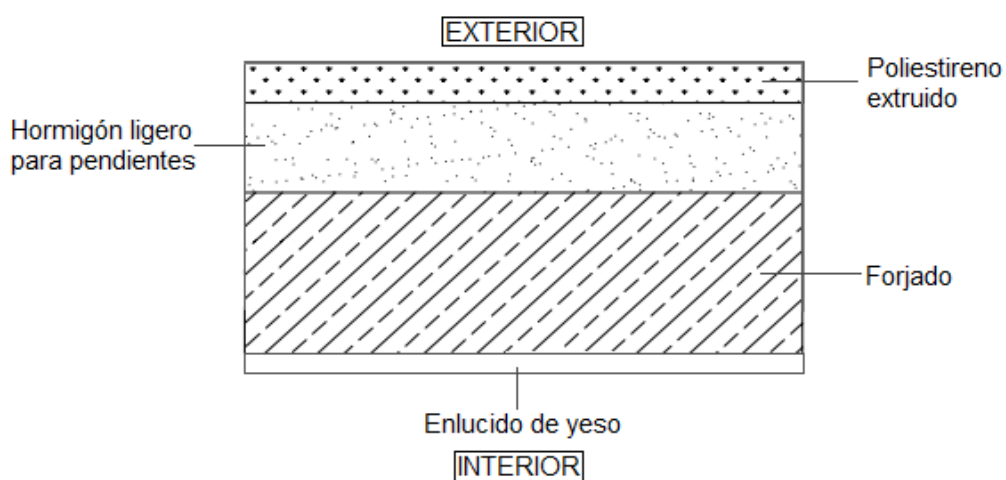


Figura 20. Estructura aislamiento externo.

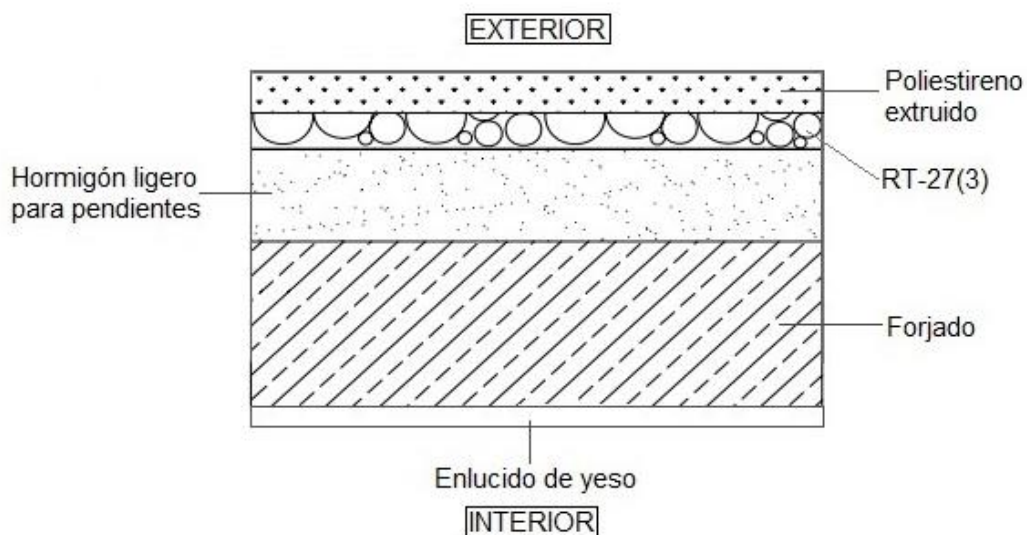


Figura 21. Estructura material aislante y material de cambio de fase.

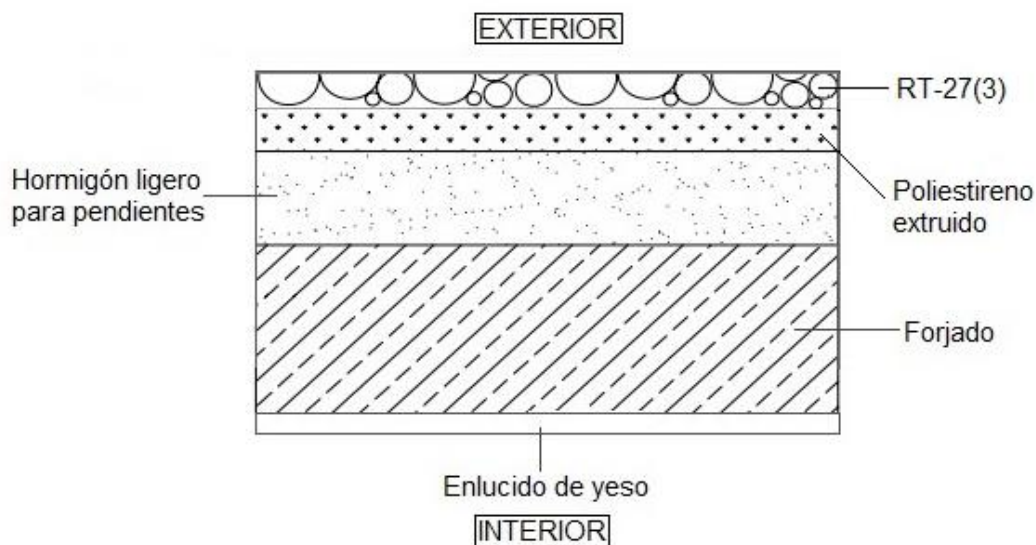


Figura 22. Estructura material de cambio de fase y aislante.

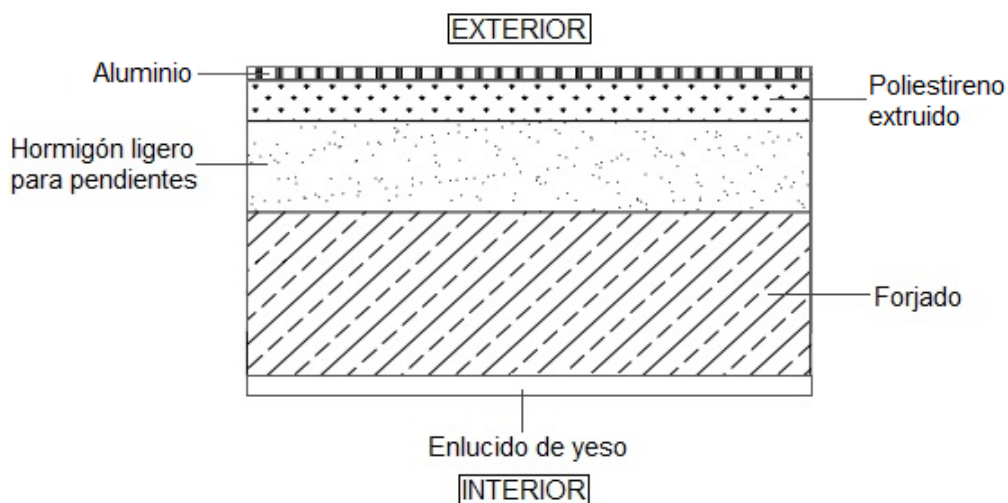


Figura 23. Estructura material reflectante y aislante.

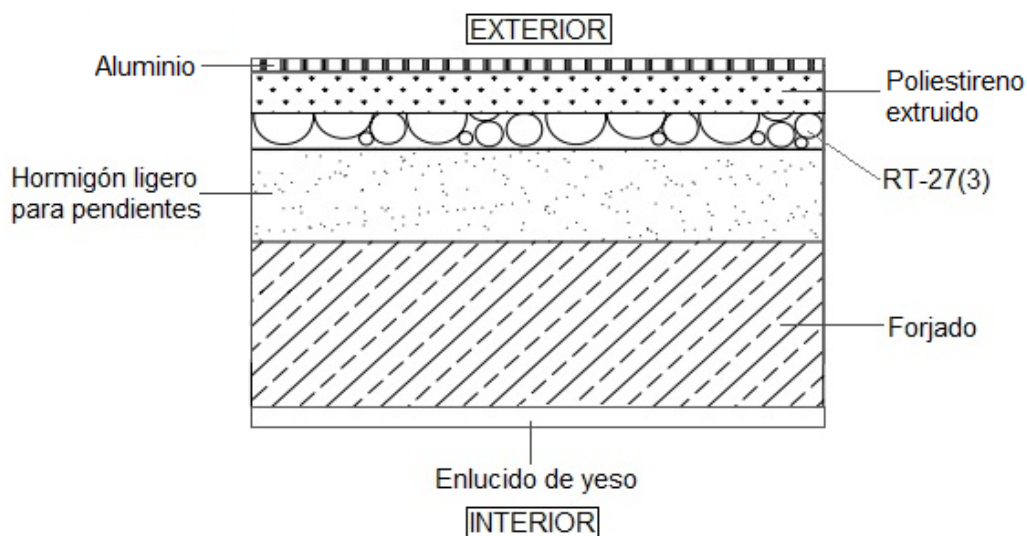


Figura 24. Estructura material reflectante, aislante y cambio de fase.

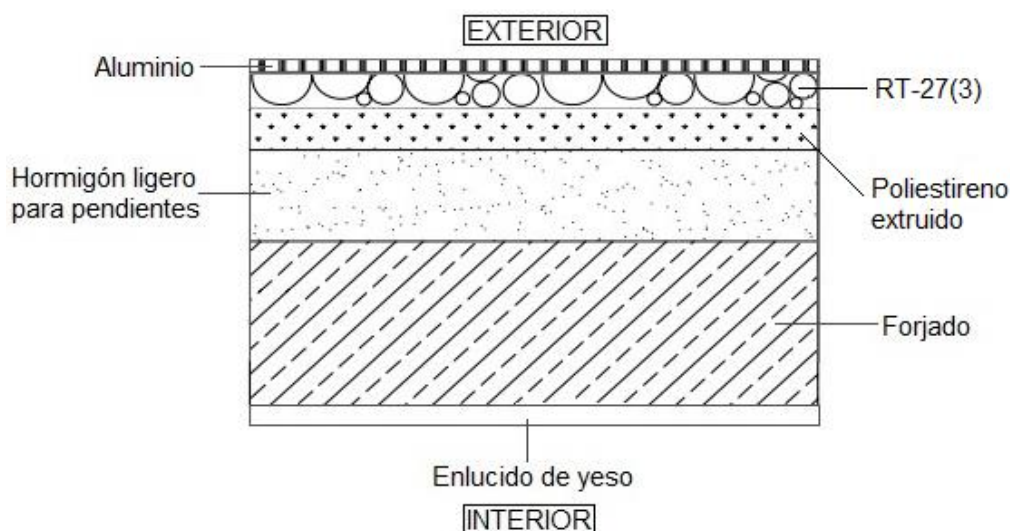


Figura 25. Estructura material reflectante, cambio de fase y aislante.

En la tabla 12 se muestran todos los materiales que han sido utilizados en las diferentes configuraciones de cubierta comentadas anteriormente junto a su espesor.

Tabla 12. Materiales cubierta [27].

Elemento	Material	Espesor (m)
Cubierta	Aluminio	0,002
	Poliestireno extruido	0,04-0,2
	RT-27(3)	0,02
	Hormigón ligero pendientes	0,1
	Forjado	0,3
	Enlucido de yeso	0,015

4.6 Materiales

Los materiales utilizados en el diseño del modelo y sus propiedades se muestran en las tablas 13 - 17. Los datos se han obtenido del Catálogo de Elementos Constructivos del Código técnico de la Edificación.

Tabla 13. Materiales y propiedades [27].

Nombre	Ladrillo cerámico perforado	Enlucido de yeso	Forjado	Entrevigado Cerámico
Conductividad (W/m·K)	0.35	0.57	0.28	0.89
Densidad (kg/m³)	780	1100	1240	1220
Calor específico (J/kg·K)	1000	1000	1000	1000
Absortividad térmica	0.9	0.9	0.9	0.9
Absorción solar	0.7	0.2	0.7	0.7
Absorción visible	0.7	0.7	0.7	0.7

Tabla 14. Materiales y propiedades [27].

Nombre	Hormigón c/áridos ligeros	Hormigón Ligero Pendientes	Ladrillo hueco sencillo	Mortero cemento para albañilería
Conductividad (W/m·K)	1.35	1.35	0.32	1.8
Densidad (kg/m³)	1900	1900	770	2100
Calor específico (J/kg·K)	1000	1000	1000	1000
Absortividad térmica	0.9	0.9	0.9	0.9
Absorción solar	0.5	0.5	0.7	0.65
Absorción visible	0.5	0.5	0.7	0.65

Tabla 15. Materiales y propiedades [27].

Nombre	Roble	Tabique ladrillo hueco sencillo	Cámara aire no ventilada
Conductividad (W/m·K)	0.18	0.445	0.6
Densidad (kg/m³)	710	1000	800
Calor específico (J/kg·K)	1600	1000	1000
Absortividad térmica	0.9	0.9	0,95
Absorción solar	0.5	0.7	0,7
Absorción visible	0.5	0.7	0,7

Tabla 16. Materiales y propiedades [27].

Nombre	Poliestireno extruido	Aluminio	RT-27(3)
Conductividad (W/m·K)	0,029	209,3	0.156
Densidad (kg/m³)	33	2700	752.0
Calor específico (J/kg·K)	1200	897	3000
Absortividad térmica	0,13	0.9	0.9
Absorción solar	0,6	0,12	0.7
Absorción visible	0,6	0,12	0.7

Tabla 17. Materiales y propiedades [27].

Nombre	Cámara no ventilada	Vidrio sencillo
Transmitancia térmica (W/m²·K)	-	5.7
Ganancia calor solar	-	0.83
Transmitancia visible	-	0.9
Resistencia térmica (m²·K/W)	0,173	-

4.6.1 Material de cambio de fase

El material de cambio de fase utilizado es el RT-27(3) [10]. Como cualquier otro tipo de material de cambio de fase, los factores más determinantes del mismo son su temperatura de fusión y la curva de entalpía que presenta. Debido a que la temperatura de fusión de este material es de 25,1°C a presión atmosférica, el rango de temperaturas entre el que estará sometido favorece la absorción de energía debido al cambio de fase del mismo material.

En la figura 24 se muestra la curva de entalpía de este material, la cual ha sido realizada con datos extraídos del estudio comentado anteriormente.

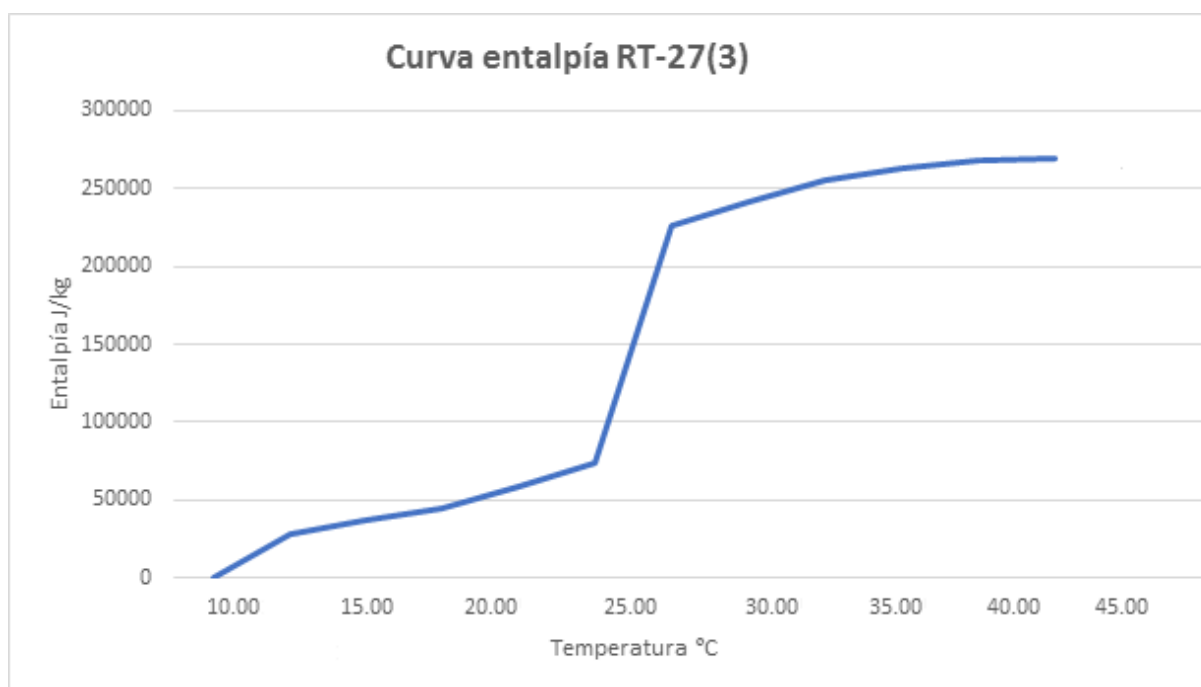


Figura 26. Curva entalpía RT-27(3)

4.7 Coste económico e impacto medioambiental

Para poder realizar un análisis de los diferentes resultados obtenidos mediante la simulación del modelo comentado, es necesario obtener los datos del coste económico e impacto medioambiental de todos los materiales utilizados en cada una de las estructuras de la cubierta expuestas anteriormente, para así poder cuantificar y determinar si las estructuras son viables o no y destacar la que proporcione un resultado más positivo respecto a las demás.

Para ello, se utilizarán los datos que se muestran en las tablas 18 y 19 que se muestran a continuación, perteneciendo al coste económico y al impacto medioambiental respectivamente:

Tabla 18. Coste económico materiales y electricidad [18][28].

Material	Coste
Poliestireno extruido (Por cada 10 mm espesor)	1,15 € / m ²
Aluminio (Por cada 3 mm espesor)	5,11 € / m ²
Energía eléctrica baja tensión	0,22 € / kWh

Debido a que no ha sido posible obtener datos sobre el coste económico del PCM, se realizará un estudio de sensibilidad para valorar la viabilidad de las opciones que lo incorporen.

Tabla 19. Impacto medioambiental materiales y electricidad

Material	Impacto	
Poliestireno extruido	1,6551 puntos / kg	
Aluminio	0,3683 puntos / kg	
PCM	Calcio (10%)	0,0045 puntos / kg
	Cloro (30%)	0,0073 puntos / kg
	Hidrógeno (45%)	0,0024 puntos / kg
	Oxígeno (15%)	0,0058 puntos / kg
Energía eléctrica baja tensión, mix español, 2015	0,0449 puntos / kWh	

Los datos de impacto de la energía eléctrica de baja tensión provienen de un mix de los datos del estado español.

Debido a la falta de datos sobre los materiales de cambio de fase, no es posible determinar con concreción el valor del coste económico y del impacto ambiental de estos. Anteriormente se ha comentado que se realizará un estudio de sensibilidad sobre unos costes hipotéticos máximos y mínimos y se procederá a determinar la viabilidad de su implantación dependiendo del rango en el que se encuentre dicho coste.

En el caso del impacto ambiental, debido a que los datos sobre la producción de este tipo de materiales no se han podido obtener, se ha basado el cálculo en la suma de impactos de cada uno de los componentes que conforman el PCM[29] implantado en esta simulación. Se asume que la exclusión del coste de la etapa de encapsulado del PCM supondrá un beneficio en cuanto a la elección del uso de PCM en la cubierta de la vivienda, pero debido a la disposición de los datos actuales se concluye que es una aproximación aceptable.

5 Resultados y análisis

Una vez realizadas las correspondientes simulaciones, para proceder a determinar qué configuración es la que aporta unos resultados más óptimos primeramente se debe cuantificar el consumo energético de la vivienda referente a la climatización para cada una de las configuraciones.

Se debe de tener en cuenta que se ha establecido una vida útil de las posibles medidas que se implantarán en la cubierta de la vivienda de 30 años, y que los datos que se mostrarán en las figuras están escalados a esta vida útil.

En el siguiente listado se especifican las abreviaciones con las cuales se van a referenciar cada una de las simulaciones en los diferentes gráficos comparativos:

- Caso base – CB.
- Material de cambio de fase en la superficie – PCM.
- Material reflectante como capa superior – REFL.
- Aislamiento externo – XPS.
- Material de cambio de fase en el interior y aislante como capa superior – XPS+PCM.
- Material aislante en el interior y material de cambio de fase en el exterior – PCM+XPS.
- Material reflectante junto a aislante en la parte superior de la construcción – REFL+XPS.
- Material reflectante, aislante y cambio de fase en orden de externo a interno sobre la superficie del lecho – REFL+AIS+PCM.
- Material reflectante, cambio de fase y aislante en orden de externo a interno sobre la cubierta existente – REFL+PCM+AIS.

5.1 Consumo energético mensual

En la figura 27 se muestra una comparativa del consumo energético mensual de la vivienda a lo largo del año, para las diferentes tecnologías implantadas en la cubierta. Tomando el consumo mensual del caso base como referencia, se ha calculado la mejora relativa de las diferentes intervenciones estudiadas.

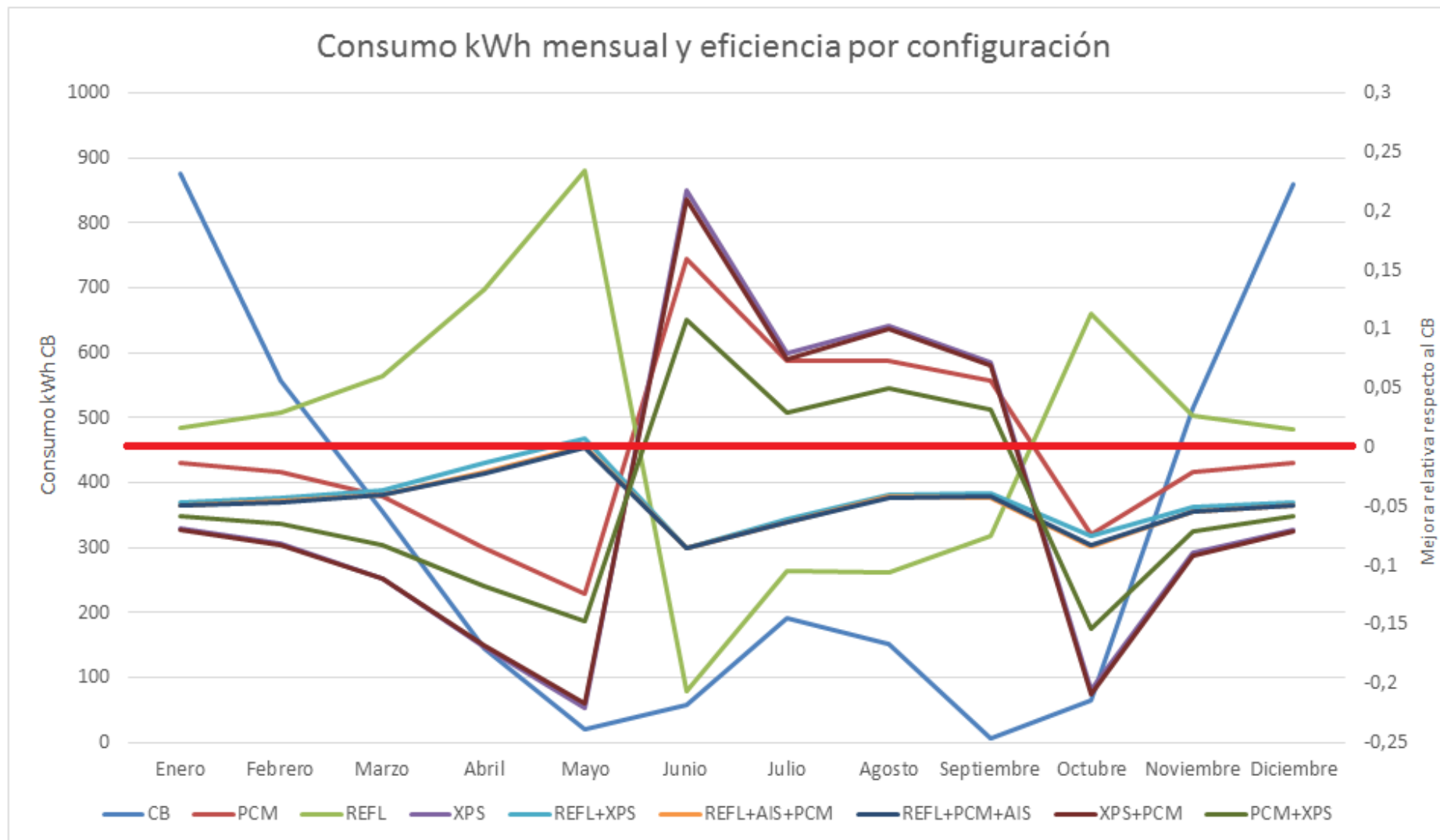


Figura 27. Comparativa consumo mensual y el ahorro generado entre configuraciones.

Con los datos extraídos a partir de la figura anterior y centrándose en la curva trazada por el consumo mensual que se produce mediante la configuración del caso base, cabe destacar la tendencia que adquiere el consumo. Esta tendencia es producida debido al clima al que está sometida la vivienda a estudiar, ya que en la zona de Lleida los inviernos son mucho más acentuados que los veranos, y por tanto las temperaturas frías se extreman mucho más que las cálidas.

Se pueden destacar tres puntos de interés a través del gráfico de la figura 27:

- El periodo de frío donde el consumo en calefacción se dispara: Noviembre – Marzo.
- El periodo de calor donde las temperaturas son cálidas pero no extremas, con un consumo de refrigeración del hogar moderado: Junio – Agosto.
- El periodo de transición entre los dos sectores anteriores, donde las temperaturas son más suaves y el consumo energético es mínimo alternando entre calefacción y refrigeración dependiendo del momento del día: Abril – Mayo y Septiembre – Octubre.

Por tanto, se puede suponer que pese a que las mejoras en todos los meses son positivas, son mucho más interesantes las mejoras en los meses de noviembre a marzo ya que el consumo es muy alto y por tanto una eficiencia energética mayor en este sector es más rentable que en los meses de transición o de calor, de mayo a octubre.

Esto se ve claramente comprobado en las figuras 27 y 28, que se mostrará más adelante. Ya que pese a que los materiales reflectantes tienen una mejora relativa mensual en algunos meses muy elevada, están claramente perjudicados en el rendimiento global por los meses de frío. Mientras que en los meses de frío la pequeña subida en el consumo para la refrigeración del hogar se ve ampliamente compensada por el ahorro energético que se produce en calefacción. Consumo anual en calefacción y refrigeración.

Una vez se ha determinado la tendencia de consumo que adquiere la vivienda dependiendo de la configuración instalada en la cubierta, se procede a analizar individualmente cuál es el consumo total anual y qué parte de este consumo se destina a la calefacción y cuál a la refrigeración de la edificación.

En la figura 28 se muestra una comparativa de dichos consumos entre las posibles configuraciones a estudiar.

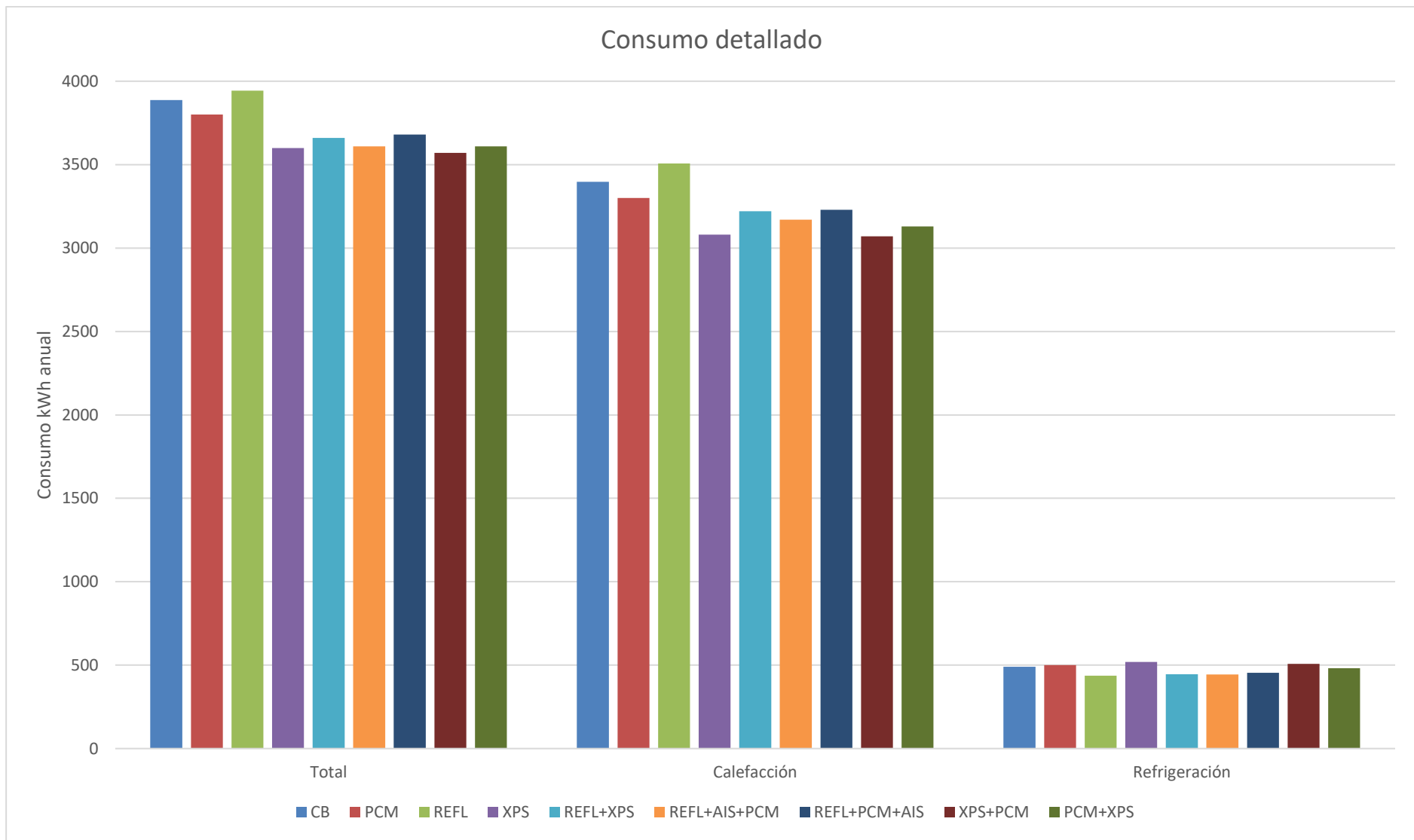


Figura 28. Detalle del consumo según la configuración.

A partir de la figura anterior se procede a analizar cada uno de los datos obtenidos de las diferentes configuraciones:

- CB: tal y como se puede observar en la figura 28, el consumo energético total de la vivienda referente a la climatización de la misma es de 3900 kWh al año. Al igual que el resto de configuraciones y del modelo en sí, el desglose del consumo muestra que el mayor gasto energético está principalmente propiciado por la calefacción del hogar debido al frío que hace en la zona climática escogida.
- PCM: la implantación aislada del PCM en la cubierta de la vivienda propicia un descenso en cuanto al consumo energético global del hogar. Si se observa con detenimiento la figura 28, el descenso de este consumo energético es propiciado por el ahorro en cuanto a la calefacción del hogar, ya que la refrigeración asciende mínimamente.

El cómputo global se traduce en ahorro debido a que el mayor consumo se establece en la calefacción, y un mínimo cambio en este ámbito es mucho más significativo que un cambio algo mayor proporcionalmente pero en la refrigeración.

- REFL: en cuanto a esta configuración propuesta, destaca el hecho que su implantación en la cubierta de la vivienda propicia un aumento en cuanto al consumo energético total de la edificación. Tal y como se observa en la figura anterior, el consumo energético derivado de la refrigeración del hogar descendiendo considerablemente, pero debido a la naturaleza de funcionamiento de este tipo de materiales, el consumo energético en los días fríos se dispara. Este hecho es debido a que la función reflectante de la lámina de aluminio instalada evita que la cubierta capte el calor procedente de la incidencia de los rayos solares en la misma, y hace de barrera a una calefacción natural de la vivienda en invierno. La implantación de este tipo de medidas de ahorro energético es contraproducente en climas como Lleida, que pese a sus altas temperaturas en verano, siguen teniendo un consumo elevado durante los periodos fríos del año.
- XPS: la implantación aislada del poliestireno extruido como capa exterior en la cubierta de la vivienda propicia uno de los mayores descensos en cuanto al consumo energético global de la edificación. Se produce tanto un descenso en el consumo energético referente a la calefacción como al referente a la refrigeración.
- REFL+XPS: el resultado de la combinación de los dos materiales anteriores en la cubierta de la edificación propicia también una mezcla de su efectividad. Por una parte se produce un descenso del consumo en cuanto a refrigeración, y por otra parte la refrigeración también descende, aunque en menor grado que con la implantación del material aislante como único elemento de ahorro. Por esta última razón, el consumo total es mayor que en la opción del material aislante como capa externa de la cubierta.

- **REFL+AIS+PCM:** la combinación conjunta de todos los materiales comentados anteriormente propician un descenso todavía más acentuado del consumo energético total respecto a la configuración anterior y consecuentemente del referente a la refrigeración y calefacción del hogar. Aun así, el consumo referente a la implantación del material aislante como único elemento de ahorro energético en la cubierta es menor que en el caso comentado.
- **REFL+PCM+AIS:** el cambio de posición entre el material de cambio de fase y el aislante tiene un efecto negativo en todos los ámbitos de este estudio. El consumo energético global, y el referente a la calefacción y refrigeración de la vivienda aumentan en comparación al caso anterior.

Este hecho puede ser debido a que la implementación del material aislante en una capa más interna que el material de cambio de fase sea contraproducente en relación a la naturaleza del funcionamiento del PCM. Es decir, el material de cambio de fase absorbe energía cuando se le somete a una temperatura mayor que la de su cambio de fase, y cuando ésta desciende la libera. Al situar el material aislante internamente, evita que el calor desprendido por el PCM llegue a la vivienda y que ésta se beneficie del aporte de calor externo.

- **XPS+PCM:** mediante esta configuración se obtiene el mayor descenso en cuanto a consumo energético global de la vivienda. Cabe destacar que el consumo energético dedicado a la refrigeración es de los más elevados, pero la combinación de ambos materiales que destacan por sí solos por descender en un amplio grado el consumo referente a la calefacción, haciendo que el cómputo general de un resultado muy positivo en el caso estudiado, siempre teniendo muy en cuenta la zona climática seleccionada.
- **PCM+XPS:** el cambio de posición de los dos materiales comentados anteriormente significan un ahorro energético muy considerable respecto al caso base, pero si se compara con los resultados obtenidos en el estudio de la configuración con el orden invertido, esta configuración propicia un menor ahorro energético en la vivienda.

La causa puede ser la misma que en el caso del cambio de posicionamiento de estos mismos materiales en la configuración REFL+PCM+AIS, ya que en este caso el poliestireno extruido vuelve a hacer de barrera al paso de la calor liberada por el PCM hacia el interior de la vivienda.

5.2 Coste económico e impacto medioambiental.

Una vez se ha analizado el consumo energético referente a la climatización de la vivienda para cada una de las configuraciones propuestas en este estudio, se procede a analizar cuál es el coste económico e impacto medioambiental de cada una de ellas.

Tal y como se ha comentado en el apartado 4.7 del presente documento, no se han podido recopilar datos sobre el coste del PCM ni el impacto ambiental que supone el proceso de microencapsulado del mismo. Por ese motivo, en la figura 29 no se tendrán en cuenta los dos factores anteriores y en las configuraciones más destacadas se realizará un estudio de sensibilidad para determinar la posible viabilidad de éstas.

En las figura 29, 30 y 31 se muestran los gráficos comparativos de los datos comentados para cada una de las configuraciones. Debe tenerse en cuenta que los datos mostrados han sido calculados para una vida útil de la cubierta de 30 años.

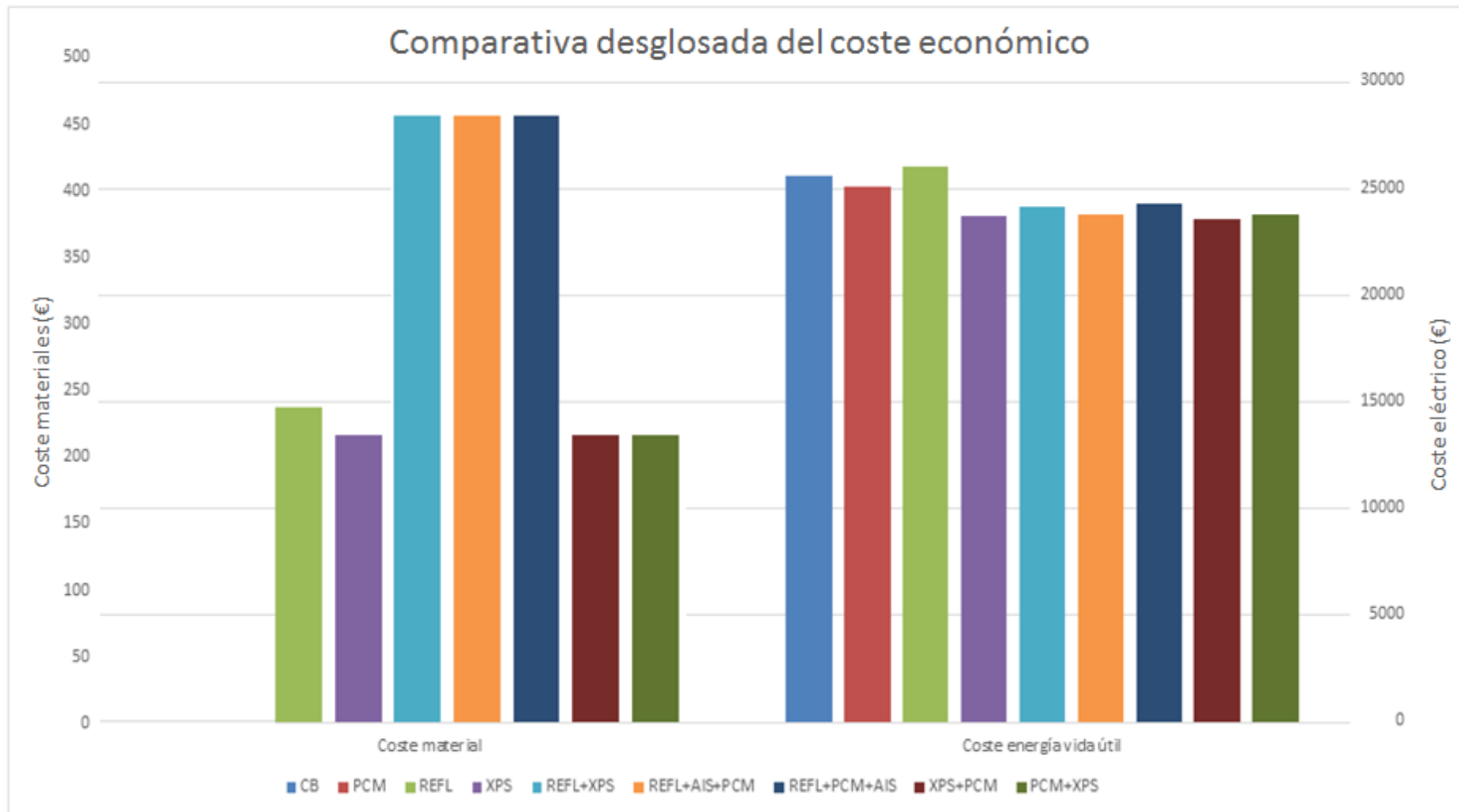


Figura 29. Comparativa desglosada del coste económico.

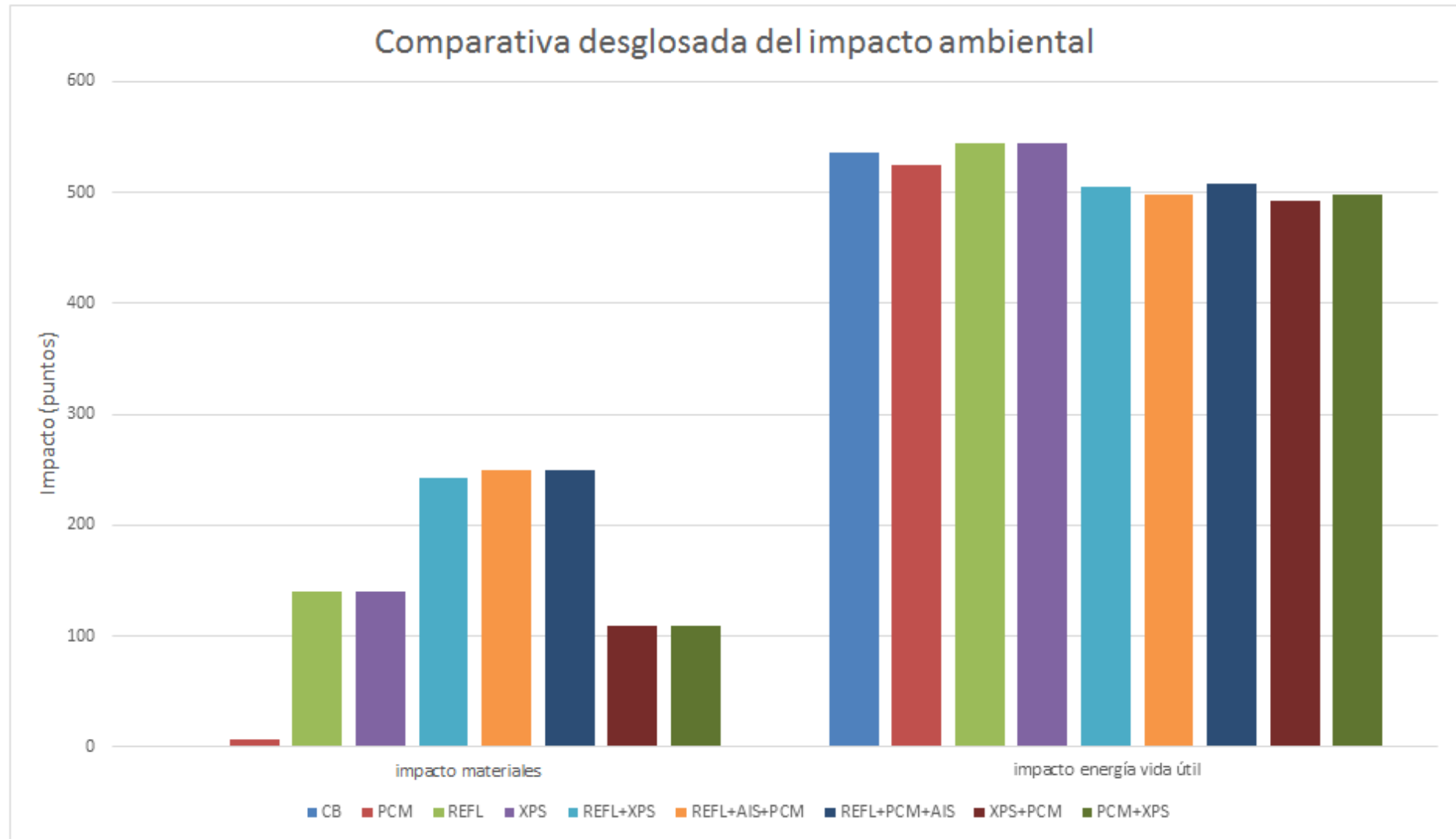


Figura 30. Comparativa desglosada impacto medioambiental.

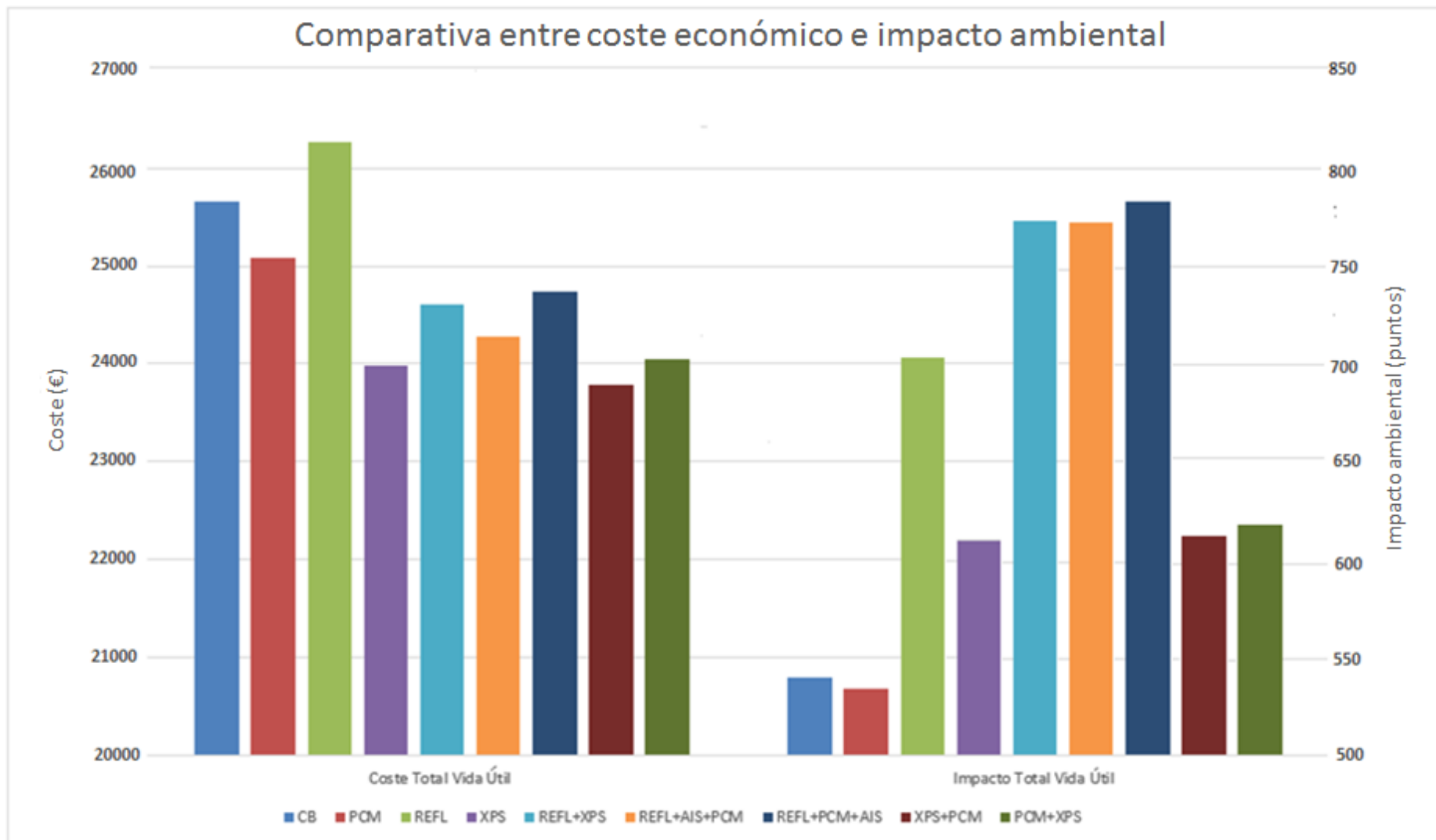


Figura 31. Comparativa coste económico e impacto ambiental de las diferentes mejoras.

A partir de las figuras anteriores se procede a analizar cada uno de los datos obtenidos de las diferentes configuraciones:

- CB: como se puede observar en la figura 31, el coste económico con la configuración de cubierta sin medidas de ahorro energético es el segundo más elevado de entre todas las opciones que se han estudiado, con un valor de 25700€ a lo largo de sus 30 años de vida útil. Esto es debido a que tal y como se mencionó en el apartado 5.1.1 debido a la gran falta de aislamiento de la vivienda, se produce un gran consumo energético destinado a climatizarla. Consecuentemente, debido a la falta de la implantación de materiales como medidas de ahorro energético, el impacto medioambiental es uno de los más reducidos ya que sólo contabiliza el consumo eléctrico.

- PCM: como ya se ha comentado en anteriores ocasiones, el coste de esta configuración no tiene en cuenta el precio del PCM. Tal y como se muestra en la figura anterior, la diferencia de coste entre el caso base y la implantación del material de cambio de fase en la cubierta de la vivienda es de 600 euros. Todo precio referente al PCM que sea menor al comentado y que aporte un payback de la medida implantada de 5 años límite hará que económicamente la implantación del PCM en el tejado de la vivienda estudiada sea viable.

Del mismo modo que con el coste económico, debido a que tampoco se ha tenido en cuenta el impacto que supone el microencapsulado del PCM en su proceso de producción, el impacto medioambiental es menor que en el caso base ya que al producirse un ahorro energético éste se ve reflejado en forma de reducción del impacto ambiental.

- REFL: debido a que la implantación del material reflectante en la cubierta del modelo estudiado es contraproducente, y consecuentemente produce un aumento del consumo energético en el hogar, también conlleva el mayor coste económico de todas las configuraciones estudiadas. El coste del material más el incremento del coste que se destina a la cantidad de energía adicional que se consume hace que esta opción sea la menos viable de todas las estudiadas tanto económica como medioambientalmente, siempre teniendo en cuenta la zona climatológica en la cual se han realizado las simulaciones.

- XPS: ya que la implantación del poliestireno extruido como capa exterior en la cubierta de la vivienda propicia uno de los mayores descensos en cuanto al consumo energético global de la edificación. También conlleva que sea uno de los métodos que producen un mayor ahorro económico. La reducción del coste aparte de ser propiciada por la reducción del consumo energético, también se ve incrementada por la simplicidad de los materiales utilizados ya que en la cubierta sólo se utiliza el aislante.

Debido a estos factores, el impacto medioambiental producido por esta configuración de cubierta también es uno de los más reducidos de entre todos los estudiados.

- REFL+XPS: como ya se ha referido anteriormente, debido a que la implantación del material reflectante es contraproducente y aumenta mucho el consumo energético en la vivienda, aunque esta configuración propicia un descenso del coste económico gracias al aislante, el cómputo global hace que tanto el coste como el impacto medioambiental sean muy elevados.

- REFL+AIS+PCM: al añadir el material de cambio de fase en la zona más interna de la configuración anterior disminuyen algo más los costes (siempre teniendo presente que el coste del PCM se está considerando nulo lo cual no es así). El hecho de añadir el material de cambio de fase hace que el impacto ambiental también se eleve y sea compensado por el ahorro en el impacto referente al consumo energético.
- REFL+PCM+AIS: como ya se determinó en el apartado 5.1.1 de este documento, el cambio de posición entre el material de cambio de fase y el aislante tiene un efecto negativo en este estudio. El consumo energético global, y el referente a la calefacción y refrigeración de la vivienda aumentan en comparación al caso anterior. Esto hace que para una misma cantidad de material respecto a la configuración anterior, tanto el coste económico global proveniente de la implementación de esta medida de ahorro energético en la cubierta y el impacto medioambiental aumenten.
- XPS+PCM: mediante esta configuración se obtiene el mayor descenso en cuanto a consumo energético global de la vivienda. Este hecho, junto a la falta de datos sobre el coste económico e impacto ambiental de PCM hacen que esta configuración sea la más óptima de todas las que se han estudiado en este modelo y en la zona climática seleccionada.
- PCM+XPS: el cambio de posición de los dos materiales comentados anteriormente significan un ahorro energético muy considerable respecto al caso base, pero si se compara con los resultados obtenidos en el estudio de la configuración con el orden invertido, esta configuración propicia un menor ahorro energético en la vivienda.

Esto hace que para una misma cantidad de material en comparación con la configuración anterior se obtengan unos resultados menos positivos, por lo cual supone una configuración menos rentable tanto económica como ambiental.

5.3 Perfil de temperatura de la cubierta

Por tal de poder interpretar con mayor claridad el efecto que propicia la implantación de los materiales reflectantes y los de cambio de fase sobre la cubierta de la vivienda, se ha procedido a realizar un estudio en el cual se puede visualizar la oscilación de la temperatura de la cubierta en función de la temperatura exterior y de la configuración de ahorro energético implantada.

Para ello se han realizado simulaciones para dos situaciones en las que la vivienda estará sometida a climas extremos opuestos:

- Un día muy caluroso de julio.
- Un día muy frío de enero.

Para realizar la comparativa de las simulaciones, se han utilizado las configuraciones de ahorro energético en que el material reflectante y el de cambio de fase han tenido un efecto mucho más significativo. Por ello, las configuraciones estudiadas han sido:

- Caso Base (CB). En el cual se podrá observar el comportamiento de la cubierta según las condiciones meteorológicas externas sin la presencia de ningún material de ahorro energético.

- Material reflectante como capa más externa de la cubierta (REFL). Debido a que la utilización de este material en la zona climatológica escogida es contraproducente y así poder observar con mayor claridad cómo afecta su implantación.
- Material aislante en la capa externa y material de cambio de fase en la interna (XPS+PCM). Ya que es la configuración que presenta un mayor ahorro energético en el modelo respecto a todos los estudiados.

En las figuras 32 y 33 se pueden observar el comportamiento de las configuraciones comentadas anteriormente en función de la temperatura a la que esté sometida la cubierta y la vivienda en general (día de calor extremo y día de frío extremo respectivamente).

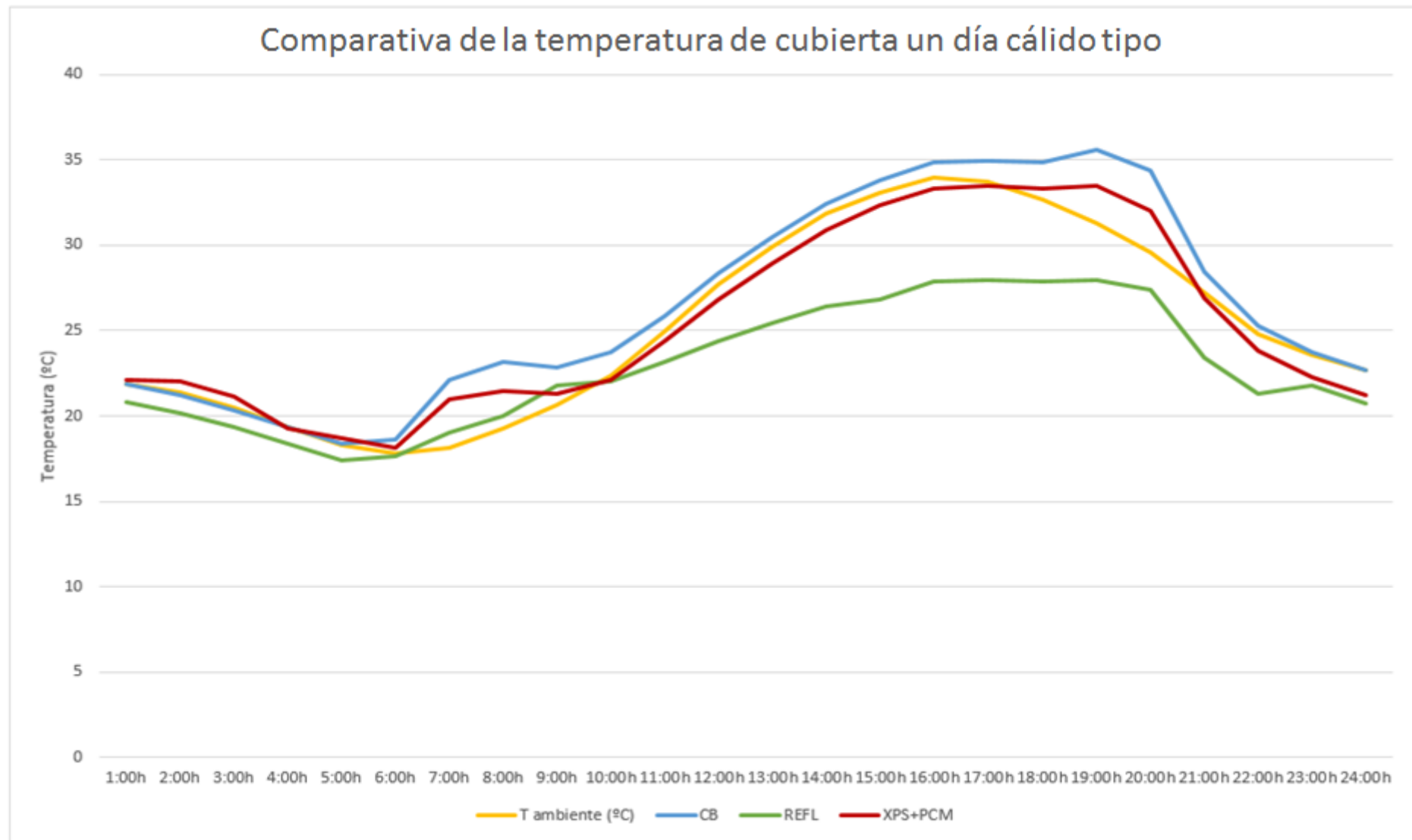


Figura 32. Temperatura de la cubierta para un día cálido típico para las diferentes configuraciones.

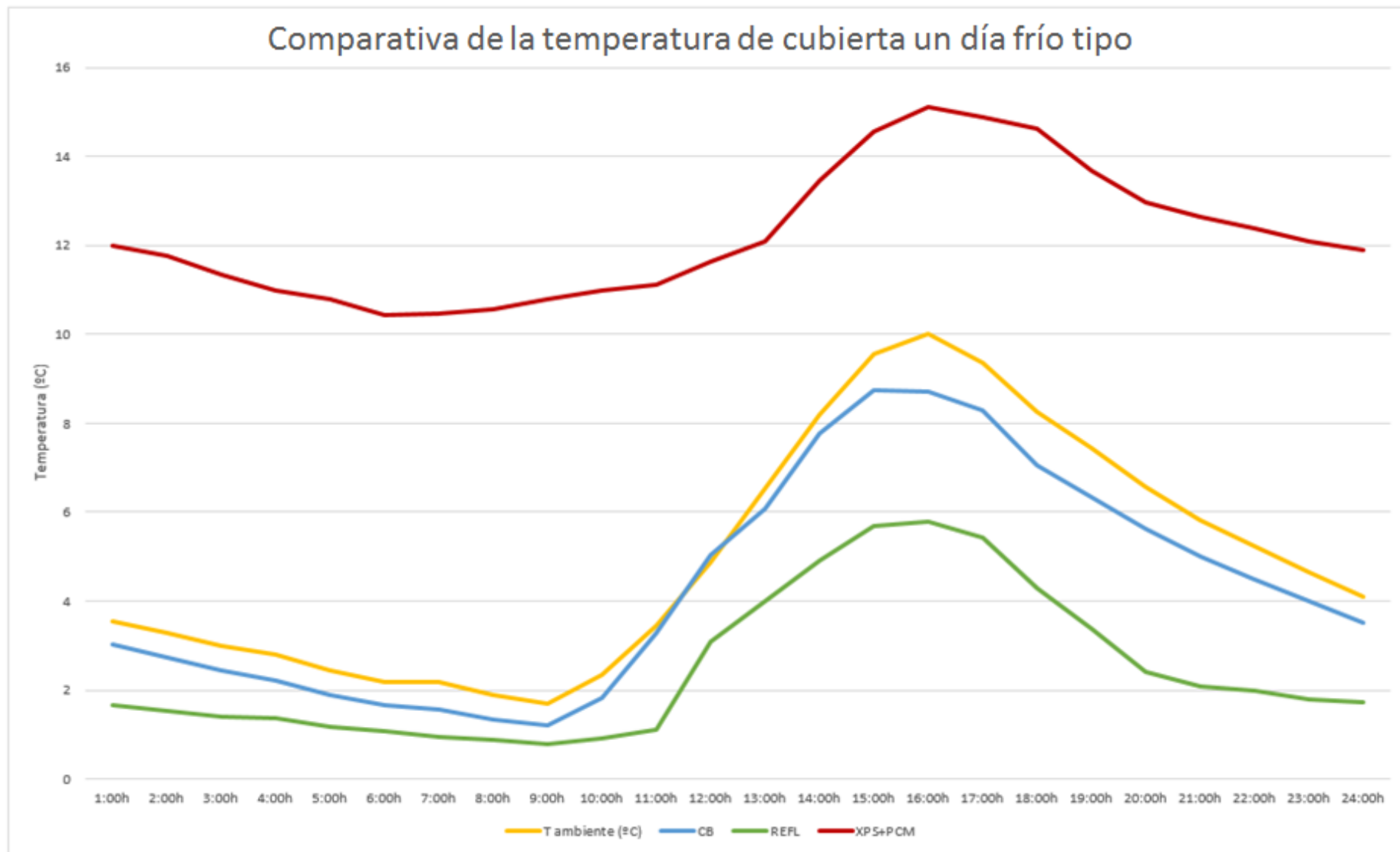


Figura 33. Temperatura de la cubierta para un día frío típico para las diferentes configuraciones.

Tal y como se puede observar en la figura 32 referente a la comparación de las distintas temperaturas de la cubierta según la configuración de ahorro energético establecida, la temperatura ambiental llega a su punto álgido a media tarde, entorno las 16h y las 17h.

Dependiendo de la configuración estipulada la cubierta reacciona de una forma diferente:

- Caso Base: debido a la falta de medidas de ahorro energético la temperatura en la cubierta se mantiene muy elevada durante todo el día. Hasta que la temperatura ambiental no desciende debido a la puesta del sol, la temperatura de la cubierta no se estabiliza en un rango más suave.
- Material Reflectante: tal y como se observa en el gráfico, la implantación de la lámina de aluminio en la cubierta de la edificación hace de pantalla hacia la incidencia de los rayos solares en la cubierta. Consiguiendo así suavizar las temperaturas y hacer que el pico máximo de temperatura a media-tarde no sea tan pronunciado.

Debido a que no permite que la vivienda se caliente durante el día con la ayuda del sol, se puede observar que por la noche la temperatura se mantiene más fría que con el resto de configuraciones.

- Material aislante con material de cambio de fase: esta configuración mejora mínimamente el consumo energético destinado a la refrigeración de la vivienda ya que impide en cierto modo la entrada del calor externo hacia el interior. Se puede observar que por la noche cuando el sol ya no incide sobre la vivienda, el material aislante y el de cambio de fase mantienen en mayor grado el calor dentro de la edificación, lo cual se traduce en un mínimo aumento de la temperatura de la cubierta respecto a la temperatura externa.

En cuanto a la gráfica de la figura 33 referente a la comparativa de las opciones anteriores en un día frío de la zona climática escogida, se puede observar que el pico de máximo calor es mucho más pronunciado al resto del día debido a que las temperaturas son muy bajas la mayor parte del tiempo.

Dependiendo de la configuración estipulada la cubierta reacciona de una forma diferente:

- Caso Base: tal y como sucede en los días calurosos, al no implantar medidas de ahorro energético en la cubierta el frío incide directamente en ésta y consecuentemente en la vivienda. Se puede observar como la temperatura de la cubierta varía al unísono con la temperatura del exterior de la edificación.
- Material Reflectante: se puede observar claramente el motivo por el cual es contraproducente la instalación de este tipo de materiales en las cubiertas de viviendas que se encuentran en zonas climatológicas muy frías. Al reflejar los rayos solares hace de barrera al calor procedente de estos durante el periodo de media-tarde, y eso hace que la temperatura en la cubierta se mantenga muy baja el resto del día.
- Material aislante con material de cambio de fase: debido a que es la opción que mayor ahorro energético aporta al modelo estudiado referente a la calefacción de la vivienda, se observa como la función aislante del poliestireno evita que el

frío entre en la casa y el PCM libera un poco de calor absorbida durante el día de la calefacción interna de la vivienda.

5.4 Espesor óptimo del XPS

Para finalizar, dado que para el modelo estudiado se ha determinado que las opciones que aportan un ahorro energético más significativo son las que incluyen el material aislante en su configuración, se ha procedido a calcular cuál es el espesor óptimo de este material siguiendo criterios económicos y medioambientales.

Se han escogido las dos configuraciones que han aportado unos resultados más beneficiosos:

- XPS.
- XPS+PCM.

En las figuras 34-37 se observan los gráficos realizados para determinar los espesores óptimos para cada una de las configuraciones según los criterios comentados anteriormente, en cada caso corresponderán al mínimo que se extrae de la curva de coste o impacto totales.

Debido a la gran diferencia de valores entre el coste o impacto eléctrico y total y el producido por los materiales, se ha procedido a representar dichos datos en dos escalas y por ese motivo no concuerda el punto donde cruzan la curva eléctrica y la recta de materiales con el mínimo total.

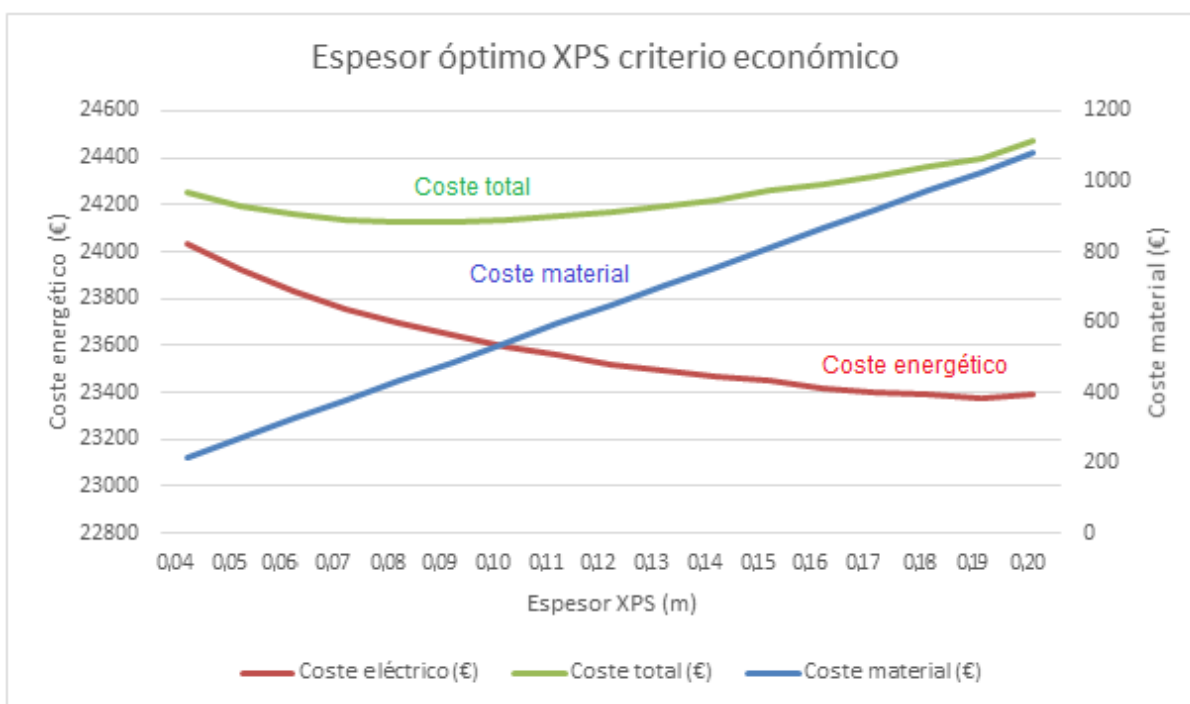


Figura 34. Espesor óptimo de aislante en configuración XPS según criterio económico.

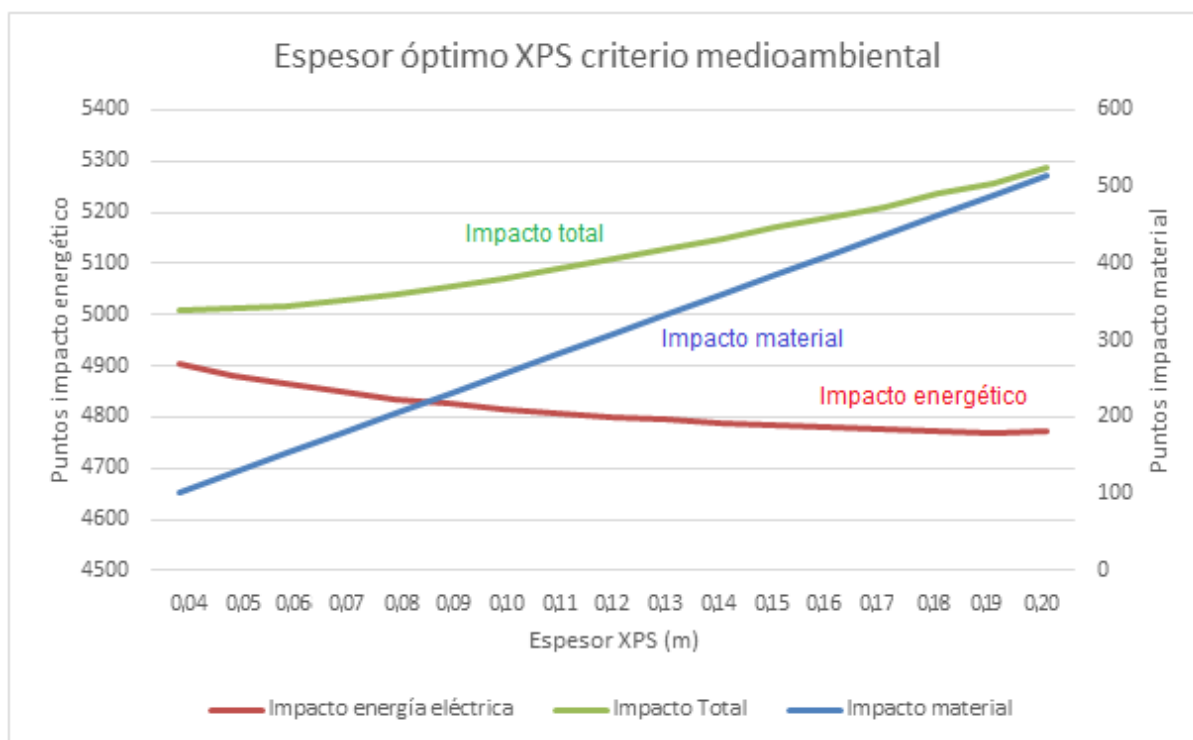


Figura 35. Espesor óptimo de aislante en configuración XPS según criterio medioambiental.

Tal como se puede observar en las dos figuras anteriores, los grosores óptimos de aislante corresponden a capas muy finas de aislante, consiguiendo con poco material un ahorro energético notable. Por otro lado y debido al alto impacto del material aislante elegido, la diferencia entre el óptimo ambiental y económico es muy diferente, correspondiendo a la mitad del grosor del óptimo de coste para el caso del óptimo ambiental.

También se puede observar que pese a la gran diferencia de coste e impacto energético y de materiales, los óptimos se ven claramente influenciados por el efecto de los materiales, ya que pese a que se consigan reducciones energéticas aún prioriza la elección de materiales. Esto demuestra que la elección de materiales en la construcción es muy importante a largo plazo, y que estudios de este tipo son necesarios.

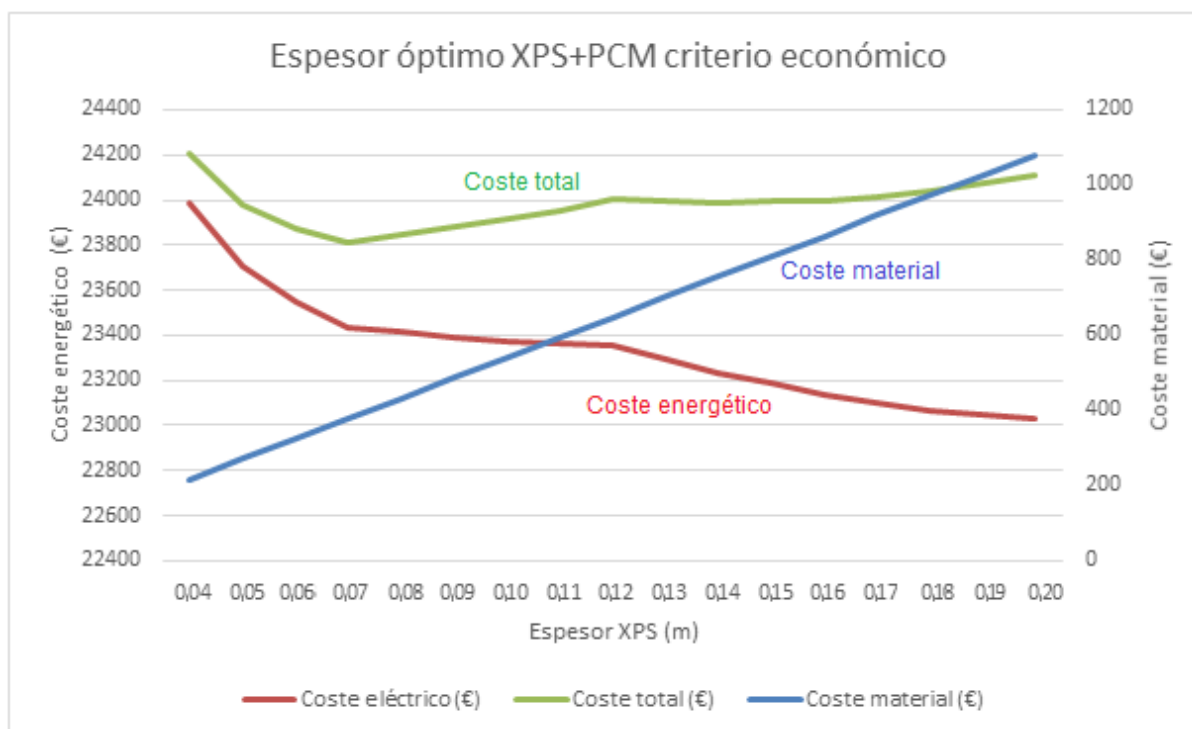


Figura 36. Espesor óptimo de aislante en configuración XPS+PCM según criterio económico.

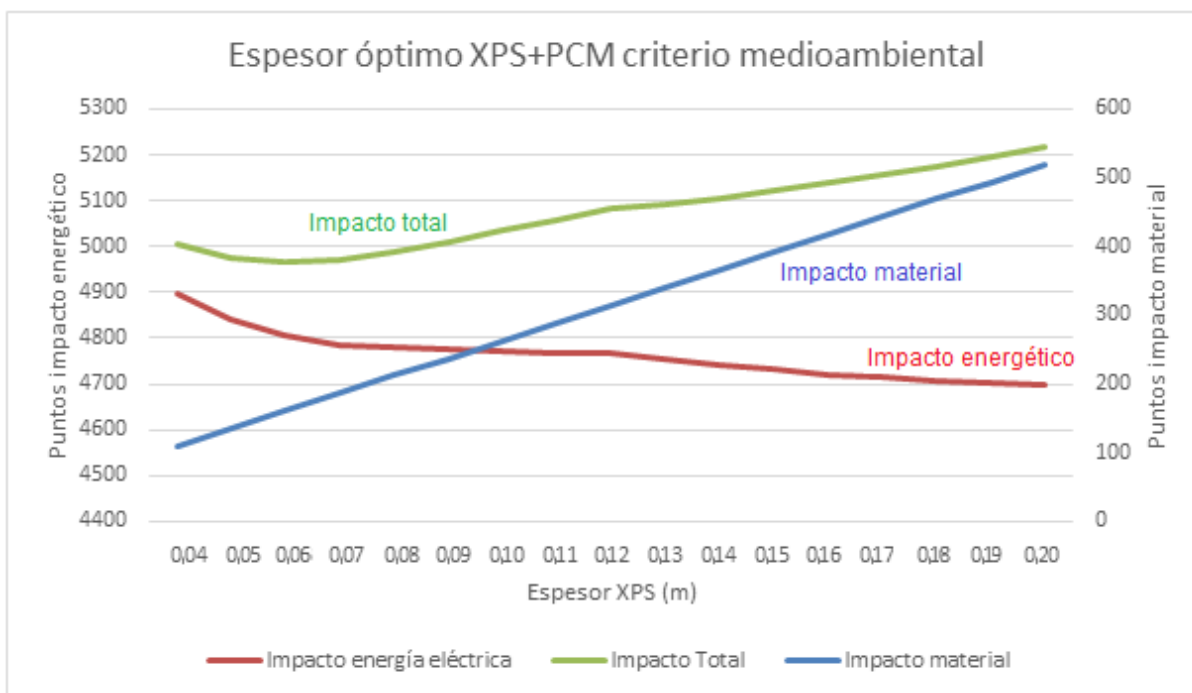


Figura 37. Espesor óptimo de aislante en configuración XPS+PCM según criterio medioambiental.

A diferencia de la configuración anterior, aunque en este caso el grosor de aislante sigue siendo relativamente fino, la diferencia entre el espesor óptimo económico y el ambiental es mínima.

Este hecho indica que en esta configuración prioriza el ahorro energético que comporta la implantación de estos materiales en la cubierta de la vivienda, dejando en un segundo plano el impacto que procede de los propios materiales.

Finalmente en la tabla 20 se muestran los espesores óptimos de poliestireno extruido resultantes de la lectura de las figuras anteriores.

Tabla 20. Espesor óptimo de XPS según criterio y configuración.

Configuración	Criterio	Espesor óptimo (m)
XPS	Económico	0,08
	Medioambiental	0,04
XPS+PCM	Económico	0,07
	Medioambiental	0,06

5.5 Estudio de sensibilidad del coste del PCM

Debido a la falta de información económica de dicho material, se procederá a realizar un estudio del tiempo de retorno de la implantación del PCM para cuantificar el precio que debería alcanzar como máximo para que fuera viable su instalación.

Para ello se realizará un análisis muy optimista, donde el tiempo de recuperación sería menor a 3 años, tiempo máximo de retorno que se suele fijar industrialmente. Posteriormente, se realizarán 2 estudios menos optimistas, 5 y 10 años, que será el retorno máximo que se podría fijar un propietario para la rehabilitación de su casa. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 21. Coste del PCM en función del tiempo de retorno de la inversión.

	3 años	5 años	10 años
Coste (€/m²)	1,28	2,13	4,26

Para comparar los costes obtenidos en la tabla 21 se ha utilizado un PCM comercial[30] con características similares al escogido para la simulación del modelo estudiado. El coste del PCM comercial es de 15,34€/m². El precio del PCM a instalar en el modelo estudiado debería ser menor, teniendo en cuenta que el precio estimado en la tabla 21 es un precio muy bajo y muy difícil de alcanzar teniendo en cuenta que para el tiempo de retorno de la inversión más optimista (10 años) el coste calculado es muy inferior al del material comercial.

6 Conclusiones

Primeramente se ha realizado la modelización de la vivienda estudiada, determinando las diferentes zonas térmicas, su estructura y los materiales que la componen. A su vez, se ha establecido la zona climatológica en la cual se sitúa dicha edificación. Para acabar la modelización de la vivienda, se han determinado las diferentes cargas, horarios, número de habitantes y los flujos energéticos que tienen lugar entre el interior y el exterior de la vivienda.

Habiendo realizado la simulación del modelo sometido a estudio, se ha podido comprobar que para la zona climática estudiada el consumo energético de la vivienda destinado a la climatización proviene en mayor parte de la calefacción de la misma, ya que debido al clima de la zona no es necesaria una refrigeración elevada de la vivienda.

En base al criterio del ahorro en el consumo energético, se ha determinado que la implantación del material reflectante en la cubierta de la vivienda es contraproducente, debido a que la naturaleza de este material evita la incidencia de los rayos del sol en la cubierta y ejerce de barrera al calor externo que aporta el sol, haciendo así que el consumo en calefacción no se dispare.

Por otro lado, la implantación del material de cambio de fase junto al poliestireno extruido, ha sido la configuración que mayor ahorro energético ha propiciado a la vivienda estudiada, debido en gran medida a que este último material ha demostrado las mejores prestaciones de funcionamiento para este modelo estudiado.

Debido a que la opción que aporta un mayor ahorro energético es la de colocar en la parte externa de la cubierta el material aislante y el material de cambio de fase, y no hacer necesaria la instalación del material reflectante propuesto, hace que esta opción también sea una de las más viables económicamente y ambientalmente.

Mediante la lectura de los datos extraídos de la simulación del perfil de temperatura de la cubierta en función de la temperatura exterior, se ha podido corroborar el efecto negativo que comporta la implantación del material reflectante en la cubierta de una vivienda situada en una zona climatológica fría, tal y como ha sucedido en este estudio en condiciones de invierno. Como punto fuerte, este material podría alargar la vida útil de la cubierta ya que reduce la temperatura máxima que alcanza dicha superficie en verano, futuros trabajos se podrían realizar en este campo para cuantificar dicha mejora.

La simulación anterior aplicada al caso que mejor resultados ha dado (XPS+PCM) ha corroborado la eficacia de este método de ahorro energético, demostrando así su funcionamiento en base al momento del día y la época del año.

Finalmente se ha procedido a determinar el espesor óptimo de aislante en las dos configuraciones de cubierta que mejor resultado han dado en cuanto a ahorro energético en la vivienda. Se han seguido para ambas configuraciones grosores de entre 7 y 8 cm para los criterios económicos por un lado, y entre 4 y 6 cm con los criterios medioambientales, destacar que dichas soluciones no incorporan el coste del PCM.

Mediante la realización del estudio de sensibilidad del coste del PCM, se han determinado los diferentes precios que debería tener el material de cambio de fase para satisfacer los tiempos de retorno de inversión determinados. Mediante la comparativa de estos valores con el coste de un PCM comercial estándar, se ha determinado que la implantación del PCM en la cubierta de la vivienda situada en la zona climatológica escogida requiere un precio del material de cambio de fase mucho menor que el del material comercial encontrado.

7 Referències

- [1] L. L. Gracia and L. C. Torrecillas, "Guía sobre Consumo Energético de Aparatos Domésticos," p. 20, 2015.
- [2] "Idescat. Anuari estadístic de Catalunya. Consum d'energia primària. Per tipus i usos." [Online]. Available: <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=502>. [Accessed: 15-May-2017].
- [3] IDAE, "Informe anual de consumos energètics," pp. 1–6, 2013. Available: <http://www.guiadelaenergia.idae.es/> [Accessed: 01-Feb-2017].
- [4] "Cubierta caliente o fría (ES) | UGINOX." [Online]. Available: <http://www.uginox.com/es/node/1099>. [Accessed: 05-Jun-2017].
- [5] "CTC y los materiales con cambio de fase: gestión térmica eficiente -." [Online]. Available: http://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/98083-CTC-y-los-materiales-con-cambio-de-fase-gestion-termica-eficiente.html. [Accessed: 05-May-2017].
- [6] N. De and A. De, "Aislante Reflectante , Capas de Control De Radiación," 2012. Available: <http://www.ecoroofingandmore.com/169130149> [Accessed: 11-May-2017].
- [7] D. Juárez Varón, S. Ferrándiz Bou, R. A. Balart Gimeno, and D. García Sanoguera, "Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro PCM," *3c Technol.*, vol. 3, pp. 54–77, 2012.
- [8] S. M. Serrano, "Eficiencia energética en edificios residenciales y metodología para su calificación energética Director :," 2012.
- [9] J. Mazo, A. T. El Badry, J. Carreras, M. Delgado, D. Boer, and B. Zalba, "Uncertainty propagation and sensitivity analysis of thermo-physical properties of phase change materials (PCM) in the energy demand calculations of a test cell with passive latent thermal storage," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 90, pp. 596–608, 2015.
- [10] A. Lázaro, E. Günther, H. Mehling, S. Hiebler, J. M. Marín, and B. Zalba, "Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 8, pp. 2168–2174, 2006.
- [11] K. M. Al-Obaidi, M. Ismail, and A. M. Abdul Rahman, "Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review," *Front. Archit. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 283–297, 2014.
- [12] @Last Software i B. Schell, "Sketchup (Trimble)". Available: Available: [Accessed: 05-May-2017]. [Accessed: 05-May-2017].
- [13] NREL, ANL, LBNL, ORNL, i PNNL, "OpenStudio". Available: <https://www.openstudio.net/downloads> [Accessed: 05-May-2017].
- [14] U.S. Department of Energy i Energy efficiency & Renewable Energy, "EnergyPlus", 2016. Available: <https://www.energyplus.net/downloads> [Accessed: 05-May-2017].
- [15] Energy efficiency | Renewable matrix trimble. "jEplus", 2015. Available: <http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=download:start> [Accessed: 05-May-2017].
- [16] "Weather Data by Location (Lleida) | EnergyPlus." [Online]. Available: https://www.energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/ESP//ESP_Lerida.081710_SWEC. [Accessed: 15-Apr-2017].
- [17] "Màster en Enginyeria Industrial Treball Fi de Màster Avaluació del consum energètic d

- ' un edifici i optimització de l' aïllament," 2015.
- [18] "ITEC." [Online]. Available: <https://itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>. [Accessed: 21-May-2017].
- [19] "Lérida | Mapa: Lérida: España." [Online]. Available: <http://webcarta.net/carta/mapa.php?id=1215&lg=es>. [Accessed: 15-May-2017].
- [20] "Clima Lérida: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Lérida - Climate-Data.org." [Online]. Available: <https://es.climate-data.org/location/1325/>. [Accessed: 15-May-2017].
- [21] A. Cuchí and P. Sweatman, "Una visión-país para el sector de la edificación en España," *GBCe, CONAMA*, p. 70, 2011.pdf."
- [22] 2013 Roy Chudley, Roger Greeno, "MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS -Roy Chudley, Roger Greeno, 2013.pdf." .
- [23] "Marqos – Cubierta plana invertida transitable con pavimento flotante, encuentro con paramento." [Online]. Available: <http://marqos.com/2012/11/cubierta-plana-invertida-transitable-con-pavimento-flotante-encuentro-con-paramento/>. [Accessed: 15-May-2017].
- [24] C. Azcona, "Proteínas Manual de Nutrición y Dietética," pp. 1–4.
- [25] Código técnico de la Edificación, "Documento básico HE ahorro de energía," *Doc. básico HE Ahorr. energía*, vol. 2013, pp. 1–70, 2013.
- [26] Norma Española, "HS 3 Calidad del aire interior," *Código técnico la Edif.*, p. 144, 2009.
- [27] Ministerio de Fomento. Gobierno de España, "Catálogo de elementos constructivos del CTE," vol. 3, p. 141, 2010.
- [28] "Prices - Eurostat." [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/methodology/prices>. [Accessed: 27-May-2017].
- [29] S. Serrano, C. Barreneche, L. Rincón, D. Boer, and L. F. Cabeza, "Optimization of three new compositions of stabilized rammed earth incorporating PCM: Thermal properties characterization and LCA," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 872–878, 2013.
- [30] S. U. S. Climates, J. Kosny, N. Shukla, and A. Fallahi, "Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in," *Renew. Energy*, no. January, 2013.

8 ANEXOS

A.1 Tabla climática de Lleida

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	5.7	7.6	11.7	14.2	18.2	21.8	24.9	24.5	21.6	15.6	9.9	6.6
Temperatura min. (°C)	1.5	2	5.8	8	11.7	15.3	17.9	17.8	15.4	10.3	5.4	2.9
Temperatura máx. (°C)	10	13.3	17.6	20.5	24.7	28.4	31.9	31.3	27.8	21	14.5	10.3
Precipitación (mm)	23	19	32	44	53	43	21	35	48	43	31	31

A.2 Tablas de "Hotspots" de las viviendas

Número de viviendas principales, según año de construcción, número de viviendas en el edificio, dimensión del núcleo de población y plantas sobre rasante del edificio.

Año de construcción	Plantas sobre rasante	Nº de viviendas						Hotspots
		1			≥ 2			
		< 10.000 h	10.000 - 100.000 h	> 100.000 h	< 10.000 h	10.000 - 100.000 h	> 100.000 h	
< 1960	1 - 3	1.257.020	269.156	118.483	301.546	177.826	148.985	A
	≥ 4	593	428	356	135.609	384.999	1.114.148	B
1960 - 1980	1 - 3	854.358	251.277	67.753	358.810	211.583	97.215	C
	≥ 4	859	527	388	406.082	1.281.739	2.577.719	D - E - F
1981 - 2001	1 - 3	1.125.581	358.603	101.816	402.281	232.208	87.126	G - H
	≥ 4	1.479	1.272	1.131	281.421	668.325	869.166	I - J

Características y cuantificación de los Hotspots

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
Nº de viviendas	1	≥ 2	1	≥ 2	≥ 2	≥ 2	1	≥ 2	≥ 2	≥ 2		
Dimensión del núcleo	< 10.000 h	> 100.000 h	< 10.000 h	< 10.000 h	10.000 - 100.000 h	> 100.000 h	< 10.000 h	< 10.000 h	10.000 - 100.000 h	> 100.000 h		
Año de construcción	< 1960	< 1960	1960 - 1980	1960 - 1980	1960 - 1980	1960 - 1980	1981 - 2001	1981 - 2001	1981 - 2001	1981 - 2001		
Plantas sobre rasante	1 - 3	≥ 4	1 - 3	≥ 4	≥ 4	≥ 4	1 - 3	1 - 3	≥ 4	≥ 4		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Hotspot	
Viviendas	2.156.985 10,54%	1.465.122 7,02%	1.459.205 7,00%	766.716 3,68%	1.736.877 8,35%	3.179.425 15,24%	1.692.560 8,11%	767.666 3,68%	991.864 4,75%	1.142.192 5,48%	15.358.608 75,63%	20.859.821 100%
Viviendas principales	1.257.020 8,90%	1.114.148 7,89%	854.358 5,91%	406.082 2,87%	1.281.739 9,07%	2.577.719 18,25%	1.125.581 7,95%	402.281 2,85%	668.325 4,75%	869.166 6,15%	10.554.419 74,58%	14.125.848 100%
Sup. Útil viv. principales	128.827 9,78%	90.064 6,83%	88.052 6,68%	55.165 2,67%	109.569 8,30%	212.227 16,11%	132.157 10,03%	59.818 3,02%	59.979 4,55%	75.934 5,76%	971.572 73,73%	1.317.742 100%
Ocupación viv. principales (Miles de m ²)	3.246.499 8,05%	2.826.981 6,99%	2.495.956 6,17%	1.177.854 2,91%	3.774.534 9,34%	7.305.099 18,07%	3.542.961 8,76%	1.158.445 2,82%	1.968.929 4,87%	2.539.511 6,28%	30.016.529 74,26%	40.421.822 100%
Edificios	2.158.288 25,03%	115.552 1,32%	1.460.097 16,95%	62.026 0,72%	125.478 1,43%	174.242 2,02%	1.695.465 19,64%	216.053 2,51%	74.678 0,87%	73.639 0,85%	6.149.518 71,31%	8.623.875 100%