



Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## Selección y evaluación de nuevos materiales de construcción para la reducción del consumo energético

### TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Autor: Saúl Navarro Miralles**

Director: Ramón Francisco Pamies Porras

Codirector: Susana García Sanfélix

Cartagena, a 19 de Julio de 2021



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

# ÍNDICE

1.	Introducción.....	9
1.1	Introducción a materiales de construcción .....	9
1.2	Descripción del problema .....	12
1.3	Introducción a materiales de cambio de fase.....	13
2.	Estado del arte.....	16
2.1.	Techo de hormigón con alojamientos cilíndricos para adición de PCM [2] ....	16
2.2.	Revisión sobre el uso de materiales de cambio de fase micro encapsulados (PCM) en aplicaciones de construcción [3].....	20
2.3.	Estudio experimental de MPCM en muros de hormigón .....	24
2.4.	Integración de tecnologías PCM pasivas para edificios de energía neta cero	32
3.	Objetivos. ....	39
4.	Metodología.....	40
4.1.	Simulación.....	40
4.1.1.	Modelos geométricos .....	40
4.1.2.	Datos climatológicos.....	47
4.1.3.	Paneles en cerramientos .....	48
4.1.4.	Fases de la simulación .....	51
4.1.5.	Datos de la simulación.....	52
4.2.	Materiales .....	54
5.	Resultados.....	57
5.1.	Estudio comparativo: Poliuretano vs. PCM .....	57
5.1.1.	Cargas de calefacción .....	66
5.1.2.	Cargas de refrigeración.....	76
5.2.	Estudio comparativo entre PCMs con diferente espesor .....	82
5.3.	Estudio comparativo entre PCMs con distinta temperatura de fusión .....	84

6. Conclusiones y trabajos futuros .....	90
7. Bibliografía.....	93
ANEXO: Resultados y especificaciones de Designbuilder .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación general materiales de construcción .....	10
Figura 2. Hormigón armado .....	11
Figura 3. Clasificación tipos de PCMs .....	14
Figura 4. Entalpía de fusión / $T^a$ fusión .....	15
Figura 5. Modelo geométrico techo con alojamientos cilíndricos para el PCM [2]....	16
Figura 6. Evolución temperatura a) y radiación media b) en Kuwait de Junio a Septiembre [2] .....	17
Figura 7. Dominio computacional [2].....	18
Figura 8. Modelo experimental del techo de hormigón con alojamiento para PCM vacío (a). Alojamientos con PCM embebido [2] .....	19
Figura 9. Evolución del flujo de calor en función del relleno [2].....	19
Figura 10. Losa alveolar .....	21
Figura 11. Vista esquemática de placa de yeso termorregulada con MPCM.....	22
Figura 12. Evolución de $T^a$ en la habitación .....	22
Figura 13. Panel sándwich .....	23
Figura 14. Disposición cubículos .....	25
Figura 15. Estación meteorológica .....	26
Figura 16. Instrumentación .....	26
Figura 17. Temperatura en las paredes de ambos cubículos. Comparativa con y sin PCM27	
Figura 18. Temperatura en la pared sur en ambos cubículos .....	28

Figura 19.	Temperatura en las paredes durante 2 semanas. 0% abertura de las ventanas	28
Figura 20.	Detalle de temperaturas medidas en la pared sur con ventanas cerradas	29
Figura 21.	Comparación de temperaturas en la pared oeste de ambos modelos, con la temperatura máxima alcanzada en el exterior.....	30
Figura 22.	Comparación entre la temperatura de la pared sur en ambos modelos y la temperatura ambiente exterior. Ventanas abiertas .....	30
Figura 23.	Evolución del flujo de calor en las paredes sur de ambos modelos.....	31
Figura 24.	Micro cápsulas de PCM [10].....	32
Figura 25.	Mezcla micro-PCM y hormigón [10].....	33
Figura 26.	Vista esquemática del muro compuesto [2].....	34
Figura 27.	Temperatura en sección transversal. (a) muro compuesto con micro-PCM. (b) muro sin micro-PCM [2].....	34
Figura 28.	Modelo básico oficina típica [2].....	35
Figura 29.	Influencia del material de relleno en la energía de refrigeración [10].....	37
Figura 30.	Influencia del tipo de PCM en la energía de refrigeración [10] .....	38
Figura 31.	influencia de la proporción y tipo de PCM en la capacidad de absorción de energía [2]	38
Figura 32.	Modelado en planta de geometría en DesignBuilder .....	41
Figura 33.	Modelo de vivienda unifamiliar.....	42
Figura 34.	Árbol jerárquico para acceder a las distintas plantas y zonas del edificio	43
Figura 35.	Introducción de datos de acristalamiento y aberturas .....	44
Figura 36.	Vista vivienda unifamiliar en código de colores.....	44
Figura 37.	Modelo de edificio industrial.....	45
Figura 38.	Vista edificio industrial en código de colores.....	46
Figura 39.	Datos del sitio (emplazamiento del edificio).....	47

Figura 40.	Evolución de datos climáticos anual.....	48
Figura 41.	Estructura panel de poliuretano.....	48
Figura 42.	Estructura panel con PCM .....	49
Figura 43.	Pestaña de cerramientos en DesignBuilder.....	50
Figura 44.	Detalle y edición de materiales que componen el cerramiento .....	50
Figura 45.	Coeficiente global de transmisión del calor .....	51
Figura 46.	Opciones de visualización de datos .....	52
Figura 47.	Período de simulación .....	53
Figura 48.	Opciones de cálculo. Definición T <sup>a</sup> para consignas .....	53
Figura 49.	Opción de generar archivo DXF .....	54
Figura 50.	Tolerancias de tiempo con consignas no alcanzadas .....	54
Figura 51.	Curvas Temperatura VS Entalpía BioPCMs.....	56
Figura 52.	Gráfica de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21	58
Figura 53.	Valores numéricos de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21	59
Figura 54.	Gráfica de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con panel convencional	59
Figura 55.	Valores numéricos de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con panel convencional	60
Figura 56.	Gráfica de ganancias de calor. Edificio industrial con panel convencional	61
Figura 57.	Valores numéricos de ganancias de calor. Edificio industrial con panel convencional	62
Figura 58.	Gráfica de ganancias de calor. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21	62

Figura 59.	Valores numéricos de ganancias de calor. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21	63
Figura 60.	Temperaturas superficie interior y exterior panel convencional	64
Figura 61.	Temperaturas superficie interior y exterior panel con PCM	65
Figura 62.	Consumo anual de gas. Edificio industrial 2021	66
Figura 63.	Temperaturas vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21	67
Figura 64.	Potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21	68
Figura 65.	Valores numéricos potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21	68
Figura 66.	Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21	68
Figura 67.	Temperaturas vivienda unifamiliar panel convencional	69
Figura 68.	Potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar panel convencional	69
Figura 69.	Valores numéricos potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar panel convencional	69
Figura 70.	Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar panel convencional	70
Figura 71.	Temperaturas edificio industrial con BioPCM M182/Q21	72
Figura 72.	Potencia de calefacción. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21	73
Figura 73.	Valores numéricos potencia de calefacción. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21	73
Figura 74.	Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21	73
Figura 75.	Temperaturas edificio industrial panel convencional	74
Figura 76.	Potencia de calefacción. Edificio industrial panel convencional	74
Figura 77.	Valores numéricos potencia de calefacción. Edificio industrial panel convencional	75

Figura 78.	Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Edificio industrial panel convencional .....	75
Figura 79.	Temperaturas régimen dinámico vivienda unifamiliar .....	77
Figura 80.	Cargas del sistema .....	77
Figura 81.	Consumo anual refrigeración .....	78
Figura 82.	Resumen carga de refrigeración con PCM .....	78
Figura 83.	Resumen carga de refrigeración panel convencional .....	79
Figura 84.	Consumos para BioPCM Q21. Edificio industrial Año 2021 .....	84
Figura 85.	Consumos para BioPCM Q21. Edificio industrial Año 2021 .....	84
Figura 86.	Ganancias en los muros para cada material simulado .....	85
Figura 87.	Gráfico comparativo de intercambio de calor.....	86
Figura 88.	Gráfico comparativo de intercambio de calor.....	87
Figura 89.	Ganancias en los muros del edificio industrial con PCM.....	89
Figura 90.	Ganancias en las cubiertas del edificio industrial con PCM .....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Propiedades termo-físicas Hormigón y PCM [2].....	17
Tabla 2.	Composición del hormigón en ambos ensayos con/sin PCM [10].....	33
Tabla 3.	Propiedades termo-físicas de pared exterior [10] .....	36
Tabla 4.	Propiedades termo-físicas de pared interior [10].....	36
Tabla 5.	Propiedades termo-físicas del relleno [10] .....	36
Tabla 6.	Temperaturas superficie interior y exterior panel convencional.....	64
Tabla 7.	Temperaturas superficie interior y exterior panel con PCM.....	65
Tabla 8.	Consumo de calefacción anual. Vivienda unifamiliar. Panel convencional .	71
Tabla 9.	Consumo de calefacción anual. Vivienda unifamiliar. Panel con PCM .....	72

Tabla 10.	Consumo de calefacción anual. Edificio industrial. Panel convencional..	76
Tabla 11.	Consumo de calefacción anual. Edificio industrial. Panel con PCM.....	76
Tabla 12.	Consumo de refrigeración anual. Vivienda unifamiliar. Panel convencional	80
Tabla 13.	Consumo de refrigeración anual. Vivienda unifamiliar. Panel con PCM..	81
Tabla 14.	Consumo de refrigeración anual. Edificio industrial. Panel convencional	81
Tabla 15.	Estudio de consumo en calefacción para cada serie de PCM. Edificio industrial.	82
Tabla 16.	Consumo de refrigeración anual para cada serie de PCM. Edificio industrial.	83
Tabla 17.	Consumo anual para cada serie de PCM. Edificio industrial .....	83
Tabla 18.	Consumo anual de refrigeración. Distinto punto de fusión del PCM.....	87
Tabla 19.	Consumo anual de calefacción. Distinto punto de fusión del PCM .....	88
Tabla 20.	Cómputo consumo anual. Distinto punto de fusión del PCM.....	88

## 1. Introducción

Resulta evidente e indiscutible la necesidad de que la sociedad luche por su bien máspreciado, su planeta. Es por esto por lo que multitud de estudios y líneas de investigación se encuentran enmarcadas en la eficiencia energética, sostenibilidad, economía circular... todo ello bajo el sustento del desarrollo de la tecnología y descubrimiento de nuevos materiales y técnicas que permiten dicha eficiencia energética.

En los últimos años la investigación alrededor de dicha eficiencia energética se encuentra en pleno desarrollo. Abordando distintas soluciones para la evidente problemática actual, podemos encontrar soluciones centradas en sistemas de almacenamiento pasivos, unidos al estudio y desarrollo de nuevos materiales y/o composición de algunos ya conocidos.

Este estudio se centra en la investigación y propuesta de nuevos materiales que permitan en un ámbito determinado un ahorro energético considerable. Este ámbito se ha decidido que sea el de edificación/construcción. Las conclusiones a las que se llega sobre el uso de los materiales propuestos en este estudio son válidas tanto a nivel industrial como de usuario.

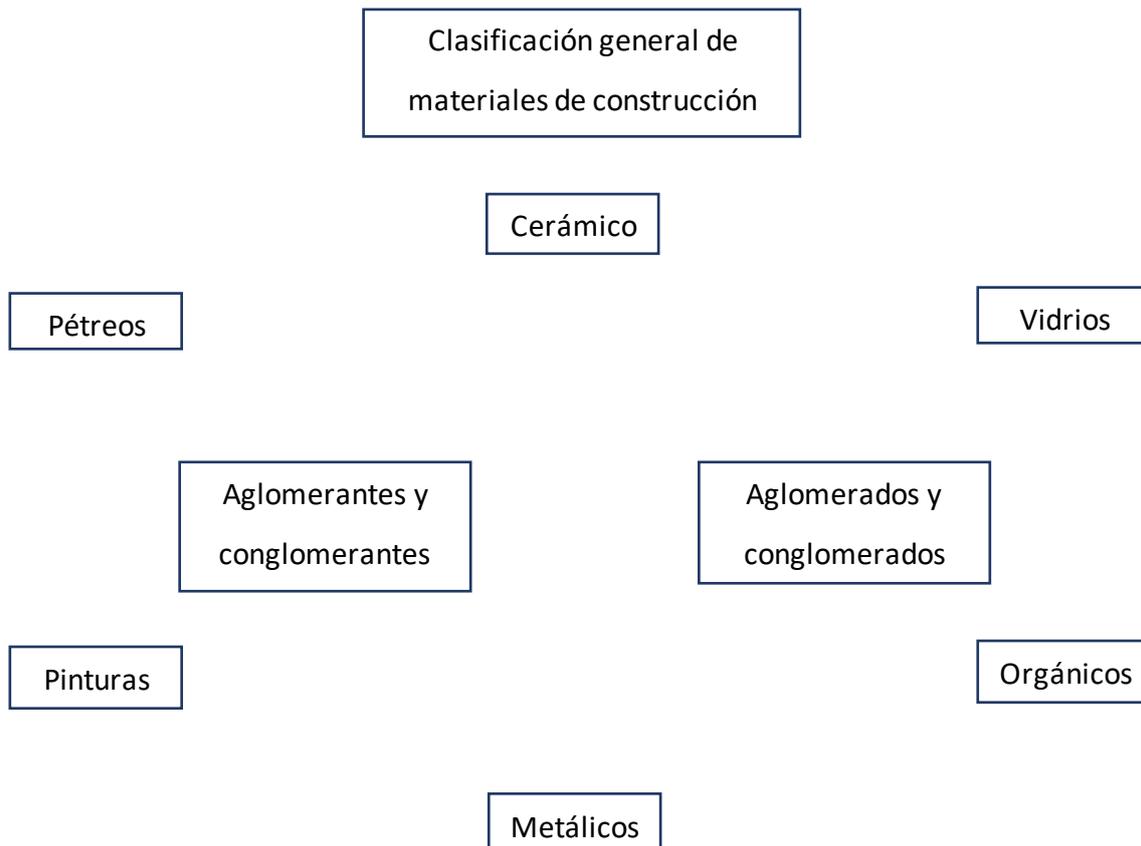
En este capítulo introductorio, se da una pincelada sobre los distintos materiales que se utilizan actualmente, y cuyo uso está altamente explotado, en el sector que se aborda.

De igual forma se introducen los materiales que se proponen como alternativos en busca del deseado ahorro energético, así como su comportamiento y propiedades más relevantes. Se trata de materiales de cambio de fase.

A lo largo de este documento se hace alusión a diversos estudios relacionados con esta temática, de los cuáles los más relevantes desde el punto de vista del autor han sido recogidos en el apartado de estado del arte.

### 1.1 Introducción a materiales de construcción

Se realiza en primer lugar una clasificación general de los principales materiales de construcción:



*Figura 1. Clasificación general materiales de construcción*

El material por excelencia utilizado en la construcción es el hormigón armado <sup>[1]</sup>. Compuesto por hormigón endurecido y, normalmente, barras de acero corrugado, pertenece tanto al subgrupo de aglomerados y conglomerados y al de metálicos.

El hormigón resulta de la mezcla de uno más conglomerantes (generalmente cemento) con áridos como la grava, gravilla y arena, agua y, normalmente aditivos. El cemento se hidrata en contacto con el agua y deriva en el fraguado y endurecimiento de la mezcla, obteniéndose al final del proceso un material con consistencia pétreo.

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión. Por el contrario, los esfuerzos de tracción suelen ser del orden de 10 veces inferiores a los resistidos en compresión. Por este motivo es habitual usarlo asociado con el acero, recibiendo el nombre de hormigón armado, comportándose el conjunto de manera muy favorable tanto a esfuerzos de compresión como de tracción. Cuando se diseña un elemento de hormigón armado se determinan las dimensiones, el

tipo de hormigón y la cantidad y calidad del acero que se deben colocar en función los esfuerzos que deberá resistir.



*Figura 2. Hormigón armado*

Algunas de las propiedades del hormigón endurecido son:

- Densidad: se trata de un material pesado, su densidad normalmente suele oscilar entre  $1000 - 3500 \text{ kg/m}^3$  en función de lo pesados que sean los áridos.
- Resistencia: la mayor virtud del hormigón es la resistencia de éste a compresión (entre 50 y 100 MPa). Su comportamiento a tracción o a flexotracción es mucho más pequeña, del orden de 10 veces menor que a compresión.

En cuanto al acero, sus propiedades varían en función de la composición de éste. No obstante, de forma general se pueden destacar:

- Densidad alrededor de  $7850 \text{ kg/m}^3$ , densidad manejable.
- Punto de ebullición muy alto.
- Alta resistencia a tracción, flexión y flexotracción.

Por tanto, de este elemento estructural cabe destacar la elevada resistencia que muestra, y por lo que es el utilizado convencionalmente. Sin embargo, presenta un grado de aislamiento térmico bajo. Es por esto por lo que en capítulos sucesivos se proponen otros materiales que servirán para reducir la conductividad térmica de los materiales de construcción.

## 1.2 Descripción del problema

En relación al consumo energético es conveniente destacar que alrededor del 40% de ese consumo lo protagoniza la industria de la edificación, y en consecuencia, toda la contaminación que este consumo genera.

La problemática de la eficiencia energética en edificación no solo radica en el consumo y consecuente contaminación, sino que además genera problemas socio-económicos en los consumidores o poseedores de cualquier tipo de residencia. Lo que se busca con la innovación de nuevos materiales y/o técnicas, es que permitan la optimización de los recursos disponibles con el fin de, como poco, mantener el estatus de confort del que dispone el usuario.

Sabemos que existen varios factores influyentes en la temperatura interior de un edificio, algunos relacionados directamente con la climatología de la zona de estudio (temperatura, viento, radiación solar...). Otros en relación a las características termofísicas de los materiales de construcción (conductividad térmica, calor específico...), así como la disposición o diseño estructural (espesor de las capas la envolvente, adición o no de materiales aislantes...)

De aquí surge la línea sobre la que se sustenta este estudio. La gran inercia térmica que presentan los materiales de cambio de fase, hace muy interesante su incorporación a los materiales de construcción.

En general, se conocen dos tipos de aplicaciones de tecnología de eficiencia térmica en edificios:

### ➤ Aplicaciones activas

Este tipo de aplicaciones presenta la ventaja de que los procesos de carga y descarga de energía no dependen exclusivamente de las condiciones climáticas, y además se puede controlar la velocidad del proceso.

Estas técnicas necesitan para su funcionamiento la implantación de sistemas auxiliares y dispositivos mecánicos -acumuladores, calentadores, bombas... - lo cual aumenta la inversión de su puesta en marcha. Por este motivo nos decantaremos por el siguiente tipo de aplicación -pasivas- como objeto de estudio de este trabajo.

### ➤ Aplicaciones pasivas

Se trata de toda aplicación que conlleva un aumento en el ahorro energético sin necesidad de intervención de ningún elemento mecánico. Es decir, en estos casos los procesos de carga y descarga se producen de forma natural y en concordancia con la variación de temperatura directamente.

Este es el principal motivo por el que se decide estudiar este tipo de tecnologías, la no necesidad de energía adicional.

Algunas de las estrategias de acondicionamiento pasivo:

- Acondicionamiento de la envolvente del edificio.
- Búsqueda de una orientación eficiente.
- Inercia térmica de los materiales -aportación de los PCMs-.

### 1.3 [Introducción a materiales de cambio de fase](#)

Los materiales de cambio de fase (de ahora en adelante PCM, del inglés Phase Change Material). Tienen la capacidad de absorber energía en forma de calor latente durante la fusión de estos, a temperatura prácticamente constante permitiendo aumentar la capacidad de almacenamiento de energía en comparación con los sistemas de almacenamiento sensible donde no tiene lugar el cambio de fase del material. Esto se traduce en un aumento en el poder de aislamiento térmico del edificio.

De igual forma en la fase de enfriamiento se produce la descarga de la energía almacenada, es decir, el proceso de aislamiento es reversible y serviría como ayuda para el aseguramiento de confort térmico en el interior del edificio tanto en situaciones en las que éste se encuentre expuesto a un ambiente de calor o frío.

En la siguiente imagen se clasifican de forma general los distintos tipos de PCMs.

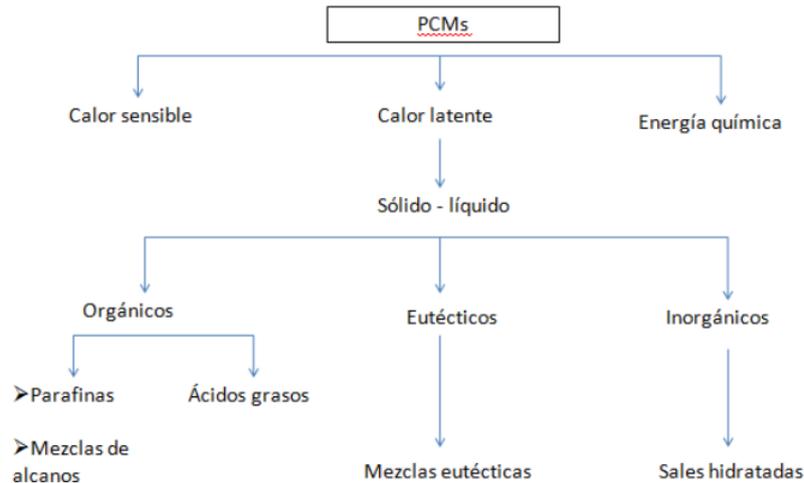


Figura 3. Clasificación tipos de PCM's

**PCM's inorgánicos:** Las más comunes son las sales hidratadas, se trata de compuestos representados por la fórmula química  $MH_2O$ , siendo M cualquier compuesto inorgánico. Este tipo de PCM tiene un coste bajo respecto al de las parafinas, aunque suelen presentar como inconveniente la segregación de fases y subenfriamiento. Una de las sales hidratadas más representativa y estudiada históricamente es la sal de Gauber.

**Mezclas eutécticas:** Los PCM's eutécticos resultan ser la mezcla de componentes orgánicos e inorgánicos. Estos tienen como principal ventaja que su punto de fusión es fijo, aunque todavía es un grupo poco estudiado, por lo que no se tiene aún mucha información. **PCM's orgánicos:** Las parafinas (ceras parafínicas, aleaciones moleculares, hidrocarburos parafínicos...) son las más utilizadas como PCM's dentro del grupo de los orgánicos, se representan mediante la fórmula química  $(C_nH_{2n+2})$ , y presentan propiedades como:

- Buena estabilidad térmica
- Baja corrosión
- Bajo impacto ambiental

Las parafinas puras suelen ser caras, por lo que suelen usarse mezclas de estas.

A continuación se representa la relación entre la temperatura y entalpia de fusión de los diferentes tipos de materiales:

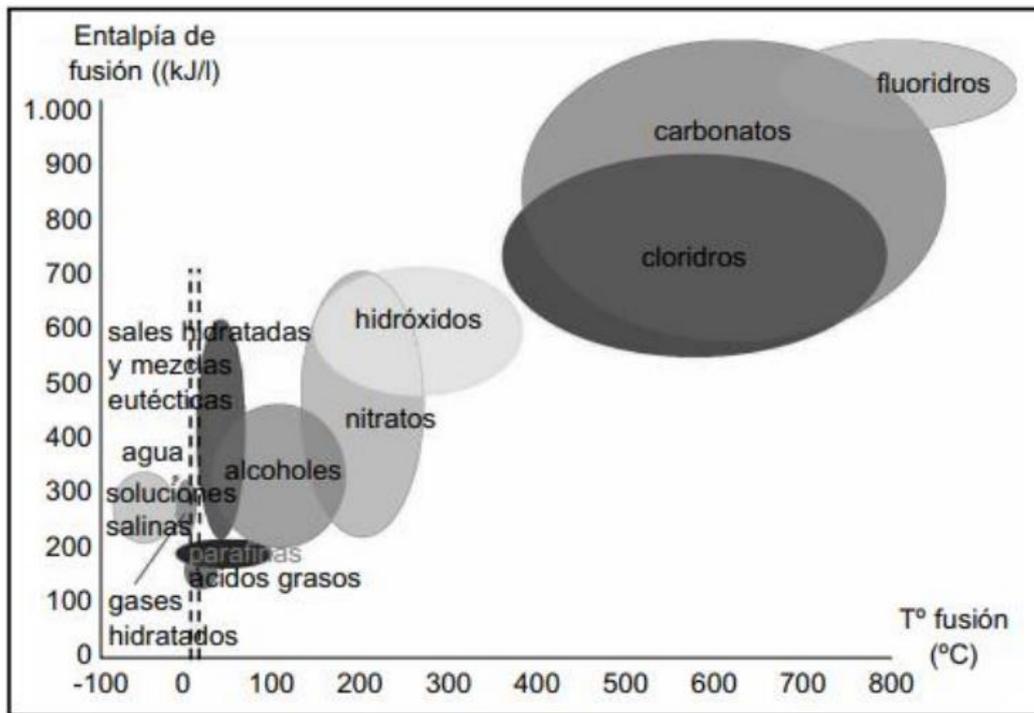


Figura 4. Entalpía de fusión / T<sup>o</sup> fusión

Como se verá en capítulos posteriores, la temperatura de fusión es un parámetro fundamental a la hora de elegir nuestro material en función del tipo de aplicación para el que se vaya a usar.

## 2. Estado del arte

En este capítulo se analizan los estudios más relevantes relacionados con la temática objeto de estudio del presente TFM. Nos encontramos con que el trabajo de investigación llevado a cabo en las últimas décadas sobre la incorporación de PCM en las envolventes de edificios es bastante extenso, debido a las necesidades energéticas ya comentadas.

### 2.1. Techo de hormigón con alojamientos cilíndricos para adición de PCM [2]

Los autores pretenden demostrar la importancia y la ventaja que supone la adición de PCM en el hormigón. En concreto llevan a cabo el estudio en un techo de hormigón sobre el que se inyecta el PCM en una serie de orificios. De esta forma se aumenta la inercia térmica del techo y se reduce el intercambio calorífico entre el espacio exterior y en interior.

Proponen la aplicación del techo durante los meses más cálidos, como aislamiento, de manera que se reduciría la demanda energética de refrigeración activa.

En la Figura 5 se muestra la representación geométrica del modelo del techo propuesto:

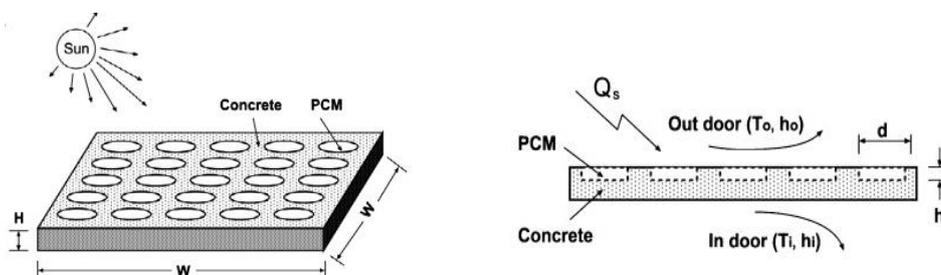


Figura 5. Modelo geométrico techo con alojamientos cilíndricos para el PCM [2]

Como se puede ver, los agujeros cilíndricos tienen como dimensiones diámetro “d” y altura “h”. Se estudian 5 configuraciones de estos variando la dimensión del diámetro, siempre manteniendo el volumen de los orificios constantes.

En cuanto a la disposición del techo, exteriormente se expone a las condiciones de temperatura y radiación variantes con el tiempo. Los autores recogieron datos sobre las fluctuaciones medias por hora de temperatura ambiente y radiación en la ciudad de

Kuwait en los meses más cálidos (desde Junio hasta Septiembre) sobre una superficie horizontal:

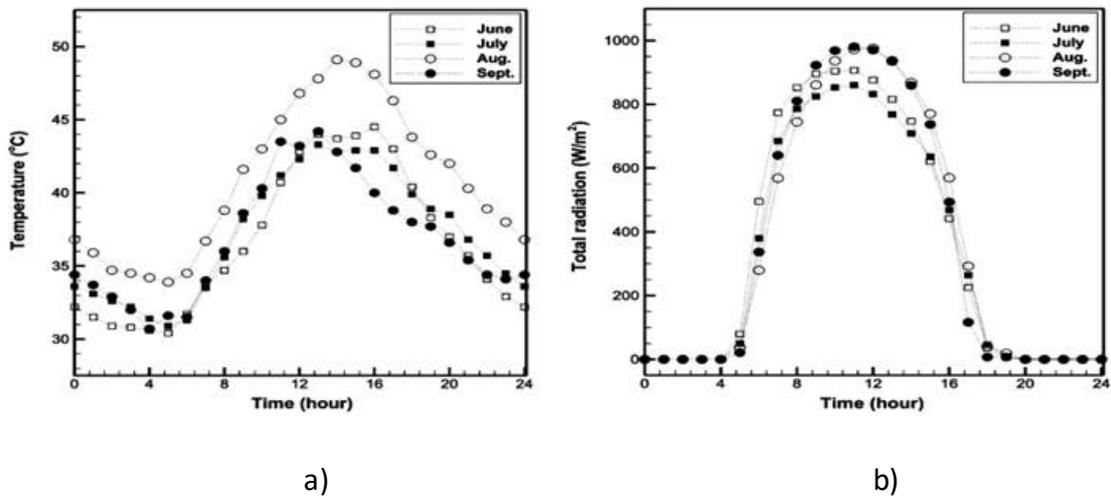


Figura 6. Evolución temperatura a) y radiación media b) en Kuwait de Junio a Septiembre [2]

Propiedades del tipo de hormigón utilizado y de los diferentes materiales -PCMs- de estudio:

Material	T (°C)	k (W/mK)	Cp (J/kgK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (J/kg)
Hormigón	-	1.25	1000	2300	-
PCMA28	28	0.21	2220	789	230000
PCMA32	32	0.21	2200	845	215000
PCMA39	39	0.22	2220	900	190000

Tabla 1. Propiedades termo-físicas Hormigón y PCM [2]

Siendo T temperatura, k conductividad térmica, Cp calor específico,  $\rho$  densidad y  $\lambda$  calor latente. Estas propiedades son importantes para este tipo de estudios, ya que influyen directamente en la capacidad de absorción de energía del sistema, en el aislamiento que puede proporcionar, y en el rango o campo de aplicación al que enfocar el estudio.

El estudio se lleva a cabo mediante un modelo numérico, cuyo dominio computacional viene representado en la Figura 7.

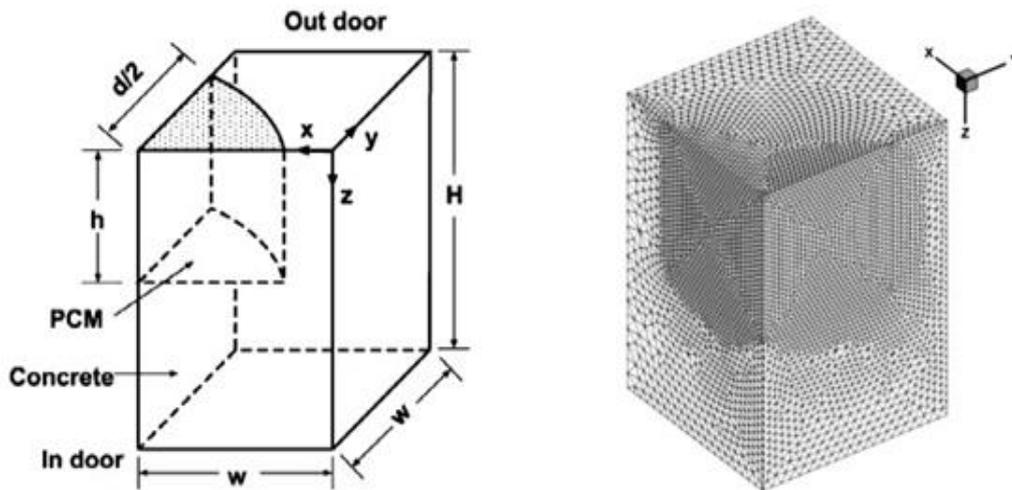


Figura 7. Dominio computacional [2]

Se estudia solamente una parte del techo, con el fin de simplificar el tamaño computacional.

Se consideran despreciables los efectos de la expansión térmica del PCM y el hormigón, y el efecto del flujo de convección natural del PCM líquido.

Para validar el modelo numérico, se lleva a cabo un trabajo experimental para el techo que consta de una losa de hormigón con orificios cilíndricos rellenos con PCM. El espesor de la losa de hormigón es de 0.15 m, mientras que el ancho y el largo son iguales a 1.5 m. El diámetro y la altura de los agujeros son de 0.1414 m y 0.075 m, respectivamente. Tal y como se muestra a continuación:



a)



b)

Figura 8. Modelo experimental del techo de hormigón con alojamiento para PCM vacío (a). Alojamiento con PCM embebido [2]

Se obtiene una alta concordancia entre los resultados numéricos y experimentales. Pero lo que verdaderamente interesaba era ver la influencia de esa adición del PCM en el bloque de hormigón. Para ello se midió el flujo de calor en la superficie interior del bloque, en el caso de que los huecos estuvieran vacíos -sin PCM- o en el caso de estar llenos. También se comparan distintos tipos de PCM:

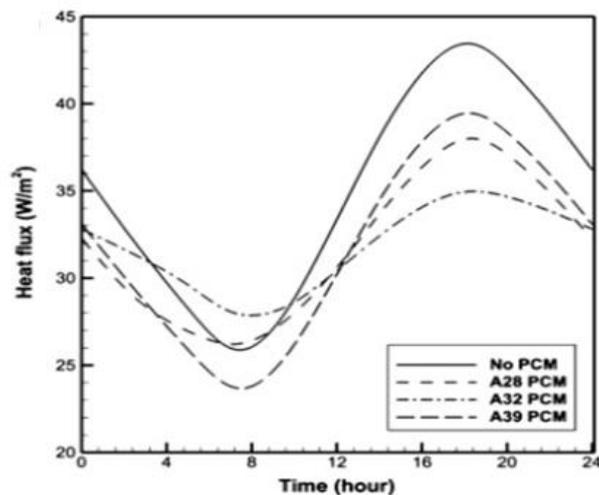


Figura 9. Evolución del flujo de calor en función del relleno [2]

Se puede ver una considerable disminución del flujo de calor, por lo que se concluye con que esta aplicación supone una solución con gran potencial de aislamiento, y su consecuente ahorro energético.

También se destaca la importancia del material que se elija como aditivo al hormigón, y de sus propiedades termo-físicas.

## 2.2. Revisión sobre el uso de materiales de cambio de fase micro encapsulados (PCM) en aplicaciones de construcción [3]

Los autores de este artículo llevan a cabo una descripción general de varias técnicas de encapsulación y aplicaciones de MPCM en edificación. Cuando se habla del almacenamiento de calor latente integrado en este ámbito -el de la construcción-, se resalta como uno de los métodos de integración del PCM, precisamente, la microencapsulación.

El proceso de microencapsulación consiste en la aplicación de un recubrimiento alrededor de las partículas en fase sólida o gotas en fase líquida, o la incrustación en matrices homogéneas -o heterogéneas- dando como resultado las microcápsulas comentadas. Además este proceso puede proporcionar una barrera física entre el material del núcleo y otros componentes [4].

En general se pueden clasificar los procesos de microencapsulación en dos grupos:

### ➤ Métodos físicos

En este grupo destacan principalmente los procesos de secado por aspersion o de lecho fluidizado y centrífugo.

### ➤ Métodos químicos

Se destacan procesos como polimerización interfacial, in situ, separación de fases o polimerización en suspensión.

Se hace referencia a las aplicaciones y los distintos de materiales, paneles o cerramientos sobre los que aplicar este tipo de técnicas:

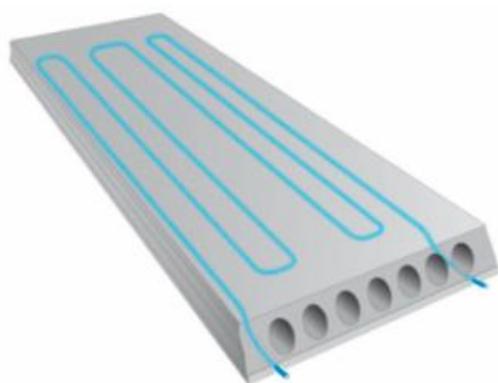
➤ PCM micro-encapsulado en hormigón y mortero de cemento.

Debido a que la incrustación de MPCM en el hormigón no solo afecta a sus propiedades termo-físicas, sino que además, influye en las propiedades mecánicas del mismo, la fracción con la que se permite aditivar el hormigón se ve por lo tanto limitada en ciertos casos, por ejemplo cuando el hormigón forma parte de una estructura autoportante. Lo que algunos autores proponen es el uso de muros compuestos, donde se disponga de un núcleo de hormigón de alta resistencia, para poder disponer de una mayor fracción de MPCM en la periferia del muro.

Los autores hicieron pruebas de resistencia a la compresión, y concluyeron que se puede considerar que las microcápsulas que contienen PCM pueden considerarse vacías, ya que no contribuyen a la resistencia -desde el punto de vista mecánico- del hormigón.

También se concluye que la incorporación de MPCM en hormigón o mortero aumenta la capacidad térmica y al mismo tiempo disminuye la eficacia conductividad térmica que conduce a la disminución de la profundidad de penetración térmica.

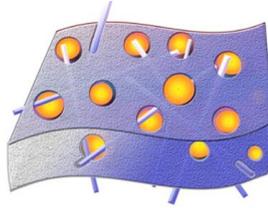
➤ Losas [5]



*Figura 10. Losa alveolar*

➤ Yeso

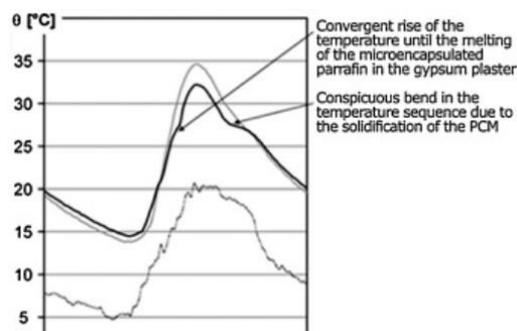
El desarrollo de un bloque de yeso con alta capacidad TES mediante la adición de PCM micro-encapsulados podría conducir a una reducción de la demanda de energía. [6]



*Figura 11. Vista esquemática de placa de yeso termorregulada con MPCM*

En [7] se analizan las posibilidades de PCM, se construyeron dos salas de pruebas idénticas en Alemania. Ambas habitaciones estaban enlucidas. Mientras que en una habitación se aplicó un enlucido modificado con parafina en las paredes circundantes, la segunda habitación se proporcionó con yeso convencional. El espesor del revestimiento de yeso fue de 1 cm al principio y luego aumentó a aproximadamente 3 cm.

Los autores confirman que por encima de los 25 °C, la habitación acondicionada con PCM se calienta más lentamente debido a la alta entalpía de fusión del PCM. Esto da como resultado una diferencia de temperatura de hasta 3 K -Figura 12-. El efecto de acumulación de calor también se puede observar durante la noche. Si se alcanza la temperatura de fusión del PCM, la habitación se enfría más lentamente debido al calor latente almacenado. Al usar PCM, la temperatura ambiente se amortigua tanto de día como de noche.

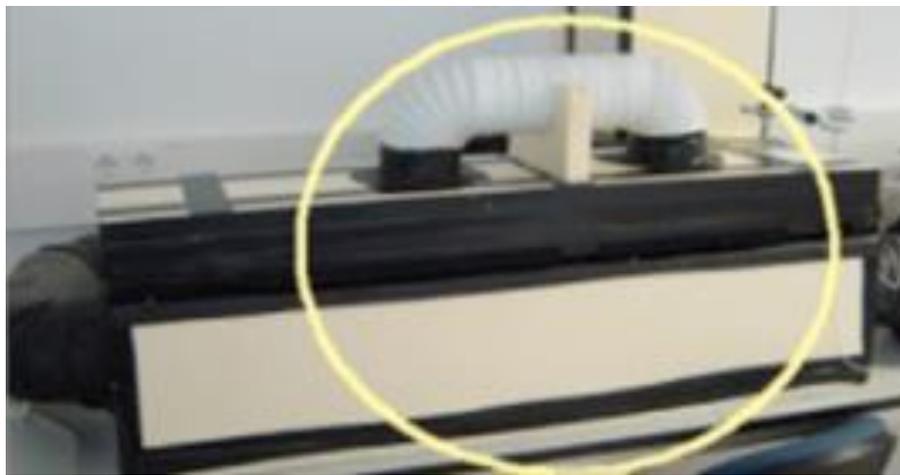


*Figura 12. Evolución de Tª en la habitación*

➤ Paneles sándwich

[8] concluyó en su estudio en que el uso de MPCM en el panel sándwich de la Figura 13 conllevó un aumento de la inercia térmica, sin aumentar significativamente el peso de los paneles. Lo cual reduce la demanda energética del edificio final. La temperatura de fusión de MPCM fue de aproximadamente 26 °C y la entalpía de cambio de fase fue de 100 kJ/kg.

Cada muestra de panel sándwich se calentó desde aprox. 23 hasta 35 °C. Durante la prueba, el panel sándwich con MPCM alcanzó la misma temperatura que la muestra de referencia sin MPCM aproximadamente 450 s más tarde.



*Figura 13. Panel sándwich*

[3] Tras realizar un barrido a un considerable número de estudios relacionados con esta temática, concluyeron que la micro-encapsulación tiene una amplia gama de aplicaciones relacionadas con el ahorro energético en la edificación. Algunos de los estudios citados en este artículo arrojan resultados que permiten asegurar que la incorporación de estos MPCMs en materiales de construcción, conlleva un aumento significativo en la capacidad de almacenamiento de energía en forma de calor latente. Sin embargo también se muestran evidencias de que el uso de dicha tecnología puede producir mermas en cuanto a las propiedades mecánicas de los materiales.

A continuación se desglosa un artículo que, a juicio del autor, parece de interés.

### 2.3. Estudio experimental de MPCM en muros de hormigón

[9] Llevaron a cabo un estudio real sobre la aplicación de MPCM en muros de hormigón. Para ello configuraron dos modelos físicos basados en una misma geometría con forma de cubo, de hormigón. En uno de los modelos el material de construcción fue hormigón convencional, mientras que en el otro se trataba de hormigón modificado con MPCM. El objetivo era estudiar el comportamiento de ambos modelos sometidos a las mismas condiciones climáticas.

El PCM utilizado fue Micronal<sup>®</sup> PCM -un PCM micro-encapsulado comercial- el cual presentaba un punto de fusión de 26 °C y una entalpía de cambio de fase de 110 kJ/kg.

El hormigón fue desarrollado dentro del proyecto MOPCON, donde una vez fabricado, se estudiaron sus propiedades mecánicas, proporcionando una resistencia a la compresión superior a 25 MPa y una resistencia a la rotura por tracción superior a 6 MPa pasados los 28 días. -Según la Instrucción de hormigón estructural (EHE-08) la resistencia del hormigón a compresión se refiere a los resultados obtenidos en ensayos de rotura a compresión a 28 días, realizados sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Dicha resistencia en hormigones estructurales no podrá ser inferior a 20 MPa para hormigones en masa, ni a 25 MPa para hormigones armados o pretensados-.

Por lo que los valores de resistencia obtenidos permiten el uso de dicho hormigón con fines estructurales.

Los cubículos fueron ubicados en Puigverd de Lleida -España-. En la Figura 14 se puede observar la disposición de ambos modelos, aparentemente idénticos, formados por la unión de 6 paneles de hormigón, a diferencia de que uno de ellos contiene aproximadamente un 5% en peso de PCM, mezclado en tres de los 6 paneles -sur, oeste y paredes del techo-. Las dimensiones de ambos cubículos son 2 x 2 x 3 m, sus paneles tienen un espesor de 1,2 mm y se presenta la siguiente distribución de acristalamientos:

Una ventana de 1,7 m x 0,6 m en la pared este y oeste, cuatro ventanas de 0,75 m x 0,4 m en el muro sur y la puerta en el muro norte.



*Figura 14. Disposición cubículos*

Ambos modelos se equiparon con la instrumentación -Figura 16- necesaria para el control y seguimiento de las magnitudes físicas objeto de estudio. Se instalaron sensores de temperatura en cada pared, en el medio de la habitación a dos alturas distintas -1,2 y 2 metros- y un sensor de flujo de calor en la pared interior del panel orientado al sur.

Para medir las condiciones de temperatura exterior, velocidad del viento y radiación solar, se instaló una estación meteorológica -Figura 15-.



*Figura 15. Estación meteorológica*



*Figura 16. Instrumentación*

Resultados obtenidos:

En la Figura 17 se representa la evolución de la temperatura en las ya citadas 3 paredes de los cubículos que se diferencian por su composición -solo con hormigón, o con MPCM-.

La Figura 18 muestra que la temperatura de la pared sur sin PCM alrededor del mediodía, es 2°C más alta que la del cubículo con PCM. Lo cual ya muestra indicios de que la adición de MPCM supone un aumento en el aislamiento térmico del cubículo.

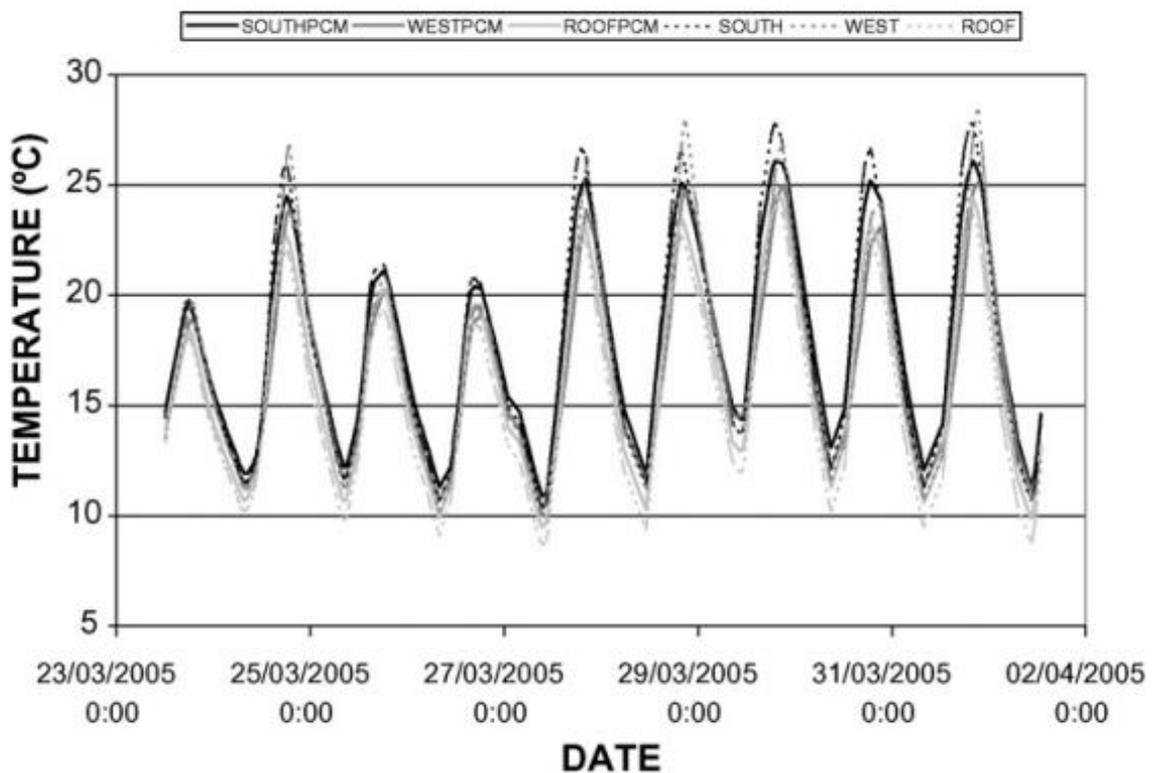


Figura 17. Temperatura en las paredes de ambos cubículos. Comparativa con y sin PCM

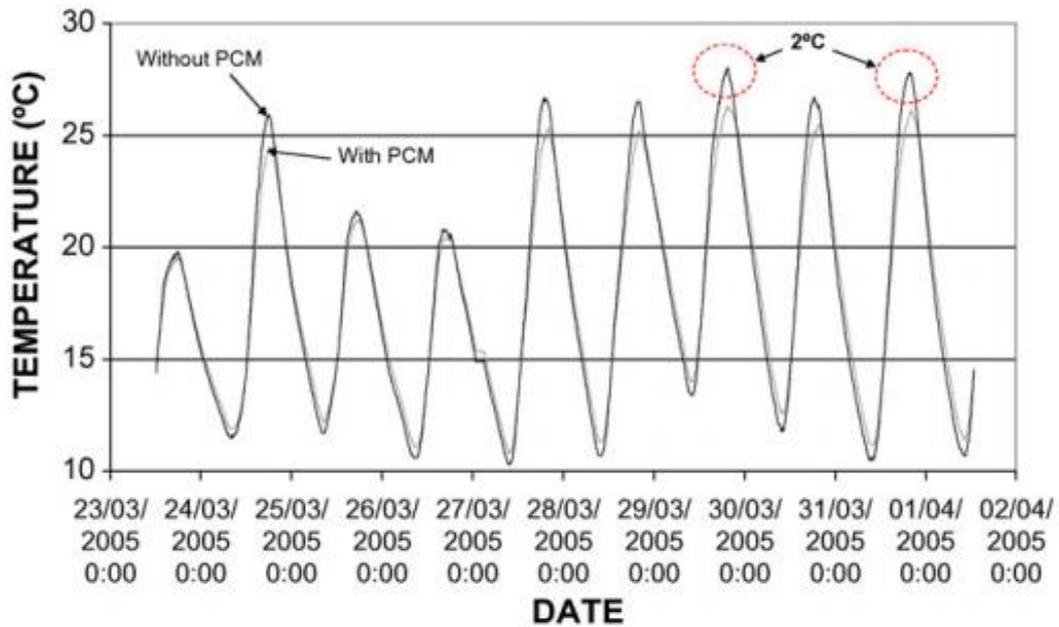


Figura 18. Temperatura en la pared sur en ambos cubículos

La Figura 19 muestra las medidas de temperatura tomadas durante 2 semanas para las paredes que contienen PCM con un porcentaje de abertura de las ventanas del 0% - primer experimento-, es decir, completamente cerradas. Con más detalle, se representa en la Figura 20, medidas de 2 días tomadas en la pared sur de ambos modelos.

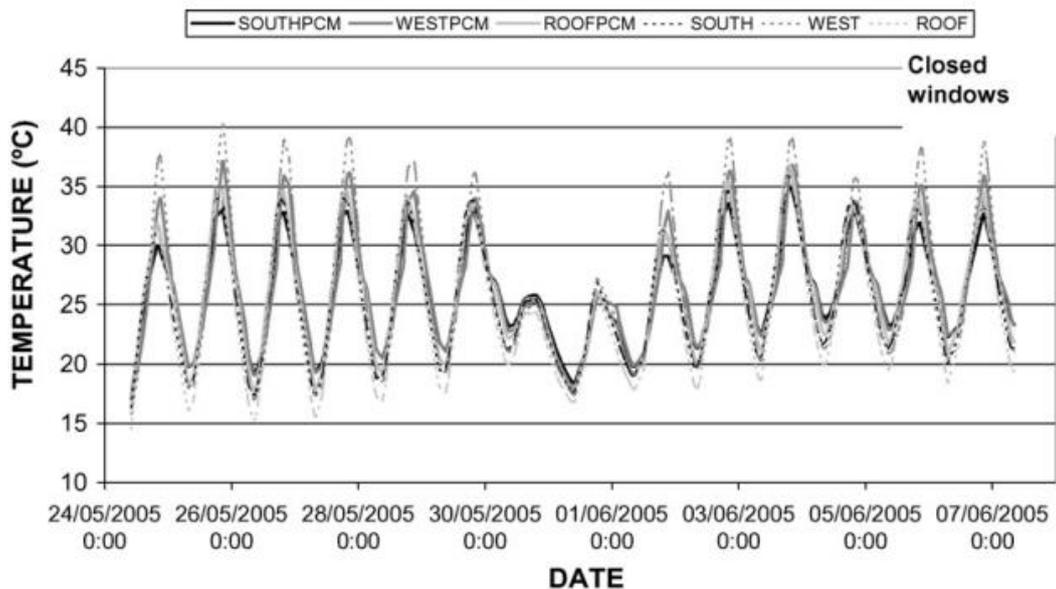


Figura 19. Temperatura en las paredes durante 2 semanas. 0% abertura de las ventanas

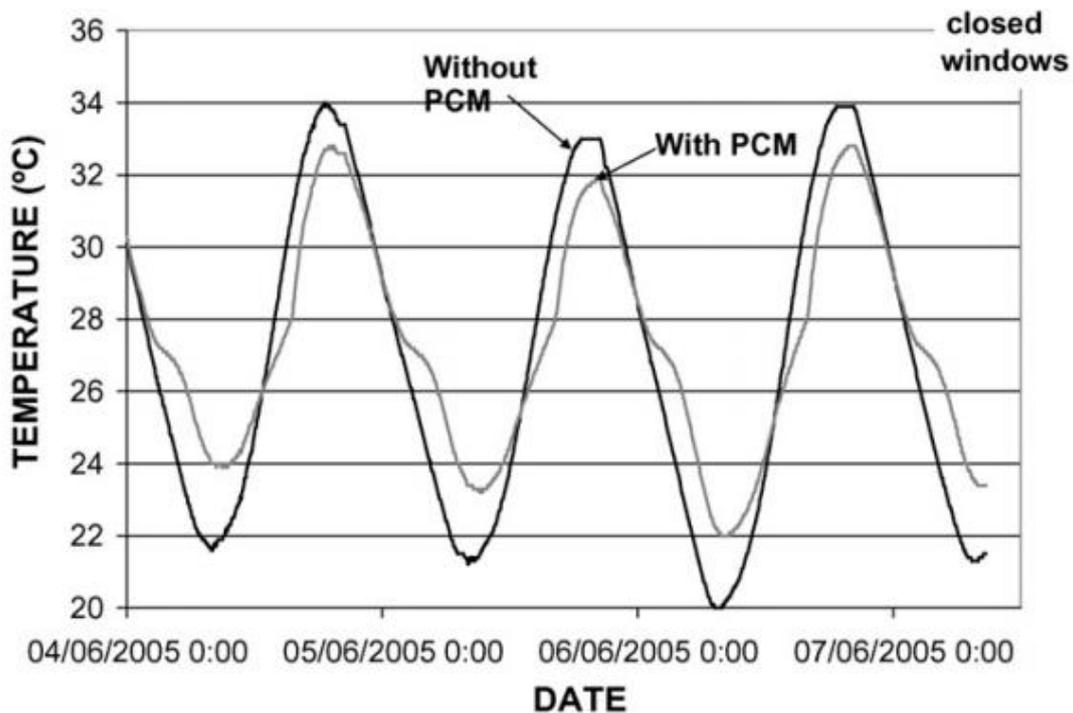


Figura 20. Detalle de temperaturas medidas en la pared sur con ventanas cerradas

En dicha gráfica -Figura 20- se pueden extraer dos aspectos importantes que permiten ir conociendo el comportamiento e influencia del sistema propuesto:

- En primer lugar, el modelo con PCM muestra una temperatura máxima 1°C más baja que la del hormigón convencional, y una temperatura mínima 2°C más alta.
- En segundo lugar, se aprecia claramente un atraso de aproximadamente 2 horas entre el momento en el que la pared con PCM alcanza su máximo valor de temperatura frente a la pared convencional. Esto se traduce en que se produce un aumento en la inercia térmica debido a la adición del PCM.

El hecho de aumentar la inercia térmica en cualquier tipo de edificación, ya sea de ámbito industrial, de oficinas, o viviendas, ofrece la posibilidad de conseguir un ahorro económico en el consumo eléctrico por climatización, ya que un atraso de 2h en la “ola de calor” daría pie a una menor demanda de consumo.

Si comparamos en la Figura 21 las temperaturas que alcanzan ambos modelos en su pared oeste, con la temperatura exterior medida por la estación meteorológica, observamos lo siguiente:

Cuando la temperatura exterior alcanza su máximo valor en 32°C, las paredes -oeste- de los modelos con y sin PCM alcanzan el valor de 36°C y 39°C, respectivamente.

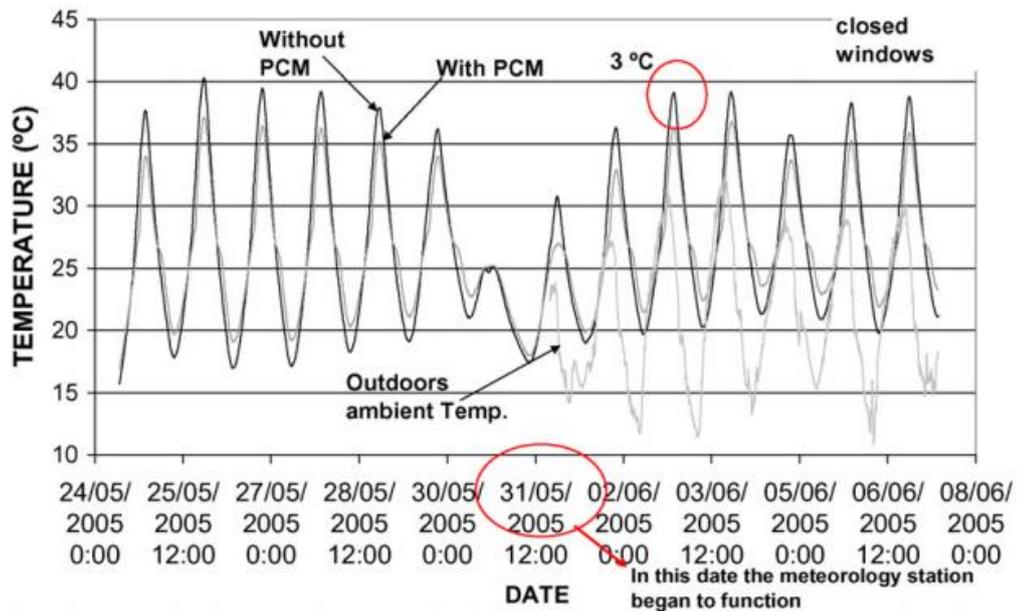


Figura 21. Comparación de temperaturas en la pared oeste de ambos modelos, con la temperatura máxima alcanzada en el exterior

Decidieron hacer un segundo experimento, cambiando el porcentaje de abertura de las ventanas en ambos modelos por igual. Se abrieron las ventanas dispuestas en la pared sur -Figura 22-.

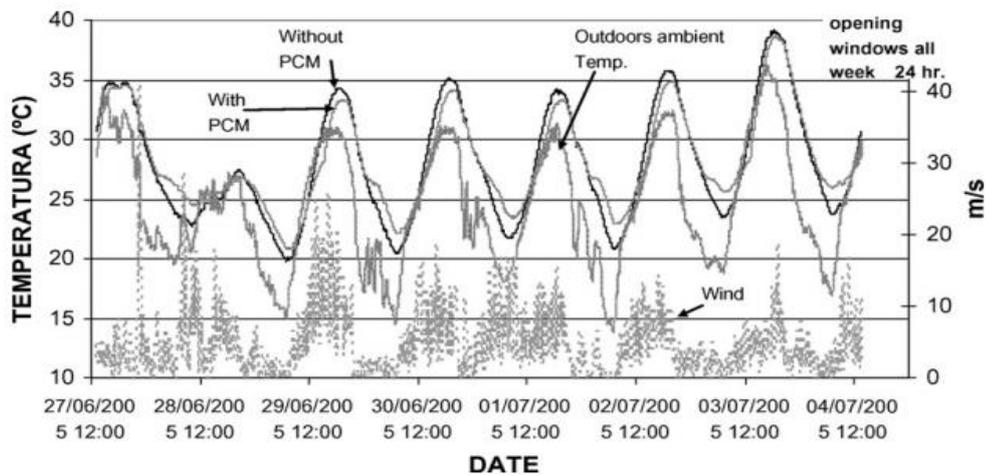


Figura 22. Comparación entre la temperatura de la pared sur en ambos modelos y la temperatura ambiente exterior. Ventanas abiertas

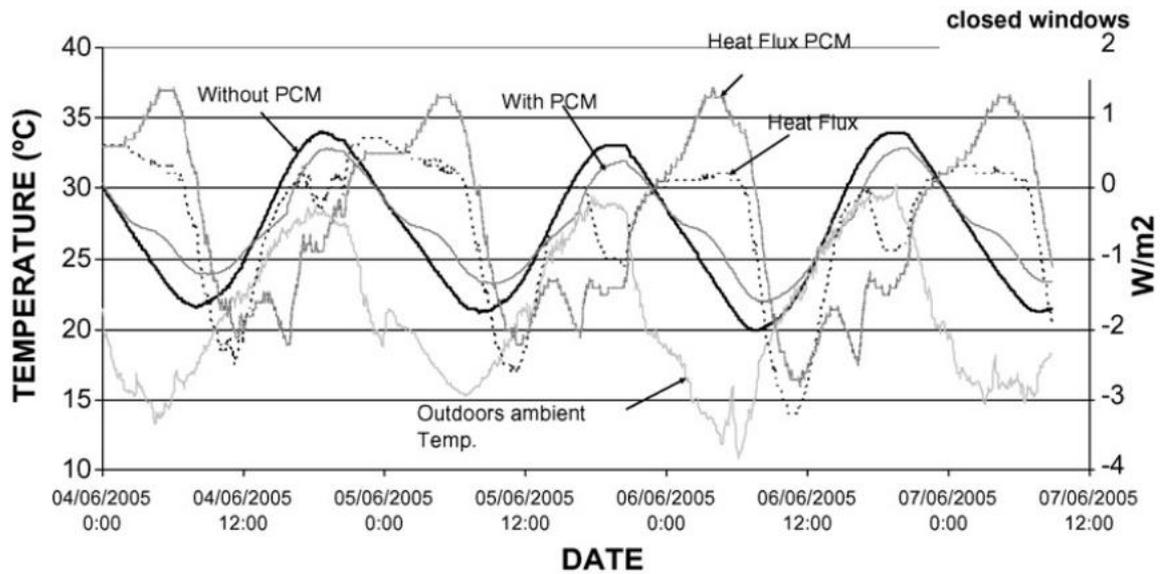


Figura 23. Evolución del flujo de calor en las paredes sur de ambos modelos

En la Figura 23 se observa la tendencia que tiene el flujo de calor en las paredes sur de ambos modelos. A priori ambos modelos presentan la misma tendencia, hasta el momento en el que se alcanza la temperatura correspondiente y se produce el cambio de fase, pues en este momento, el modelo compuesto por la mezcla hormigón-MPCM, muestra un cambio pronunciado en la tendencia del flujo de calor, debido a que en este caso el PCM durante su cambio de fase es quien está absorbiendo la energía en forma de calor latente.

Con todo esto se pudieron sacar como conclusiones:

Los resultados de este estudio muestran el almacenamiento de energía en las paredes encapsulando PCM y la comparación con el hormigón convencional sin materiales de cambio de fase que conduce a una inercia térmica mejorada, así como a temperaturas interiores más bajas. Estos resultados demuestran una oportunidad real de ahorro energético para edificios.

## 2.4. Integración de tecnologías PCM pasivas para edificios de energía neta cero

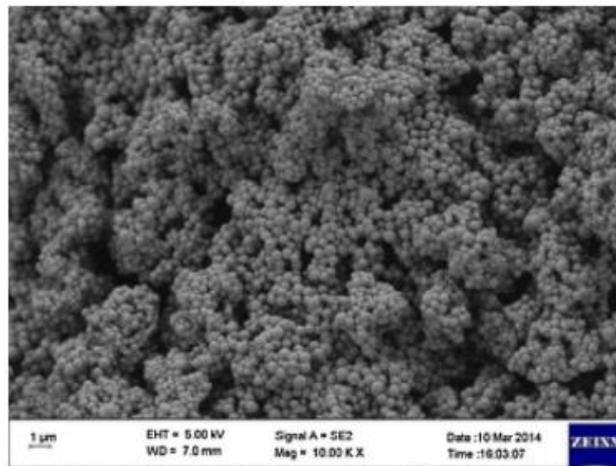
En este estudio [10] los autores presentan las características y consecuencias del uso de muros compuestos mediante micro - encapsulamiento de PCM.

La ejecución se llevó a cabo secuencialmente, en primer lugar se desarrolló el PCM micro - encapsulado, después se produjo la mezcla con el hormigón, para finalmente crear el muro compuesto.

Existían dificultades con los micro - PCMs disponibles en el mercado. Las cascaras por las que estaban compuestos se rompían durante el proceso de mezcla con el hormigón.

En la Universidad de Çukurova se desarrolló un nuevo micro - PCM con la suficiente resistencia como para poder mezclarse con hormigón. Esto se consiguió haciendo uso de una mezcla de ácidos grasos, cáprico y mirístico, con un rango de fusión de 20 - 28 °C y un calor latente de 148 kJ/kg como material central de las microcápsulas.

La Figura 24 muestra el resultado de las microcápsulas:



*Figura 24. Micro cápsulas de PCM [10]*

El diámetro medio de partícula de las microcápsulas es de 400 a 850 nm. En comparación con las microcápsulas comerciales en el mercado, este nuevo micro-PCM es aproximadamente un 50% más pequeño en tamaño.

**Mezcla del PCM microencapsulado con el hormigón:**

Añadieron un 10 % en peso de micro-PCM -esta dosis se determinó en base a resultados de pruebas de resistencia a compresión-.

La Tabla 2 muestra la composición de la mezcla que usaron los autores:

*PCE: éter policarboxílico	PCE (kg)	PCM (kg)	0-3 áridos finos triturados (kg)	5-10 áridos finos triturados (kg)	10-20 áridos triturados (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)
Hormigón sin mPCM	6.7	0	1552	628	547	675	302
Hormigón con 10% de mPCM	6.7	129.1	1324	536	467	675	295

Tabla 2. Composición del hormigón en ambos ensayos con/sin PCM [10]

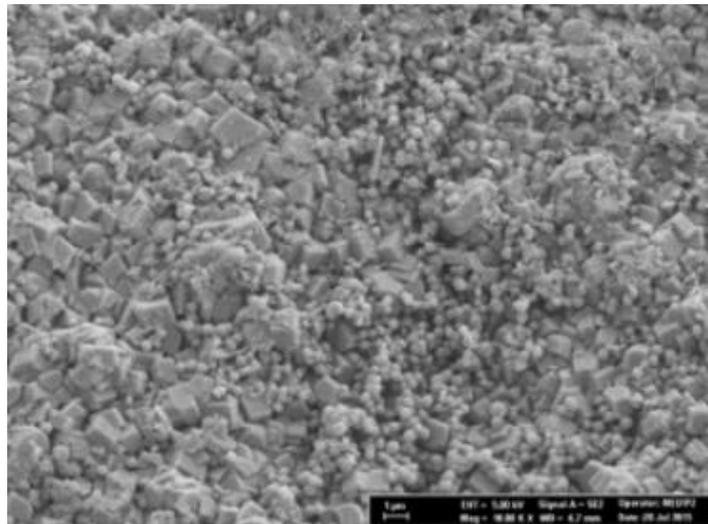


Figura 25. Mezcla micro-PCM y hormigón [10]

Se fabricó un panel compuesto de dimensiones 2 x 2 x 0.12 (m) formado por dos capas. La primera de estas se compone únicamente de hormigón, y la segunda es la que incluye la mezcla.

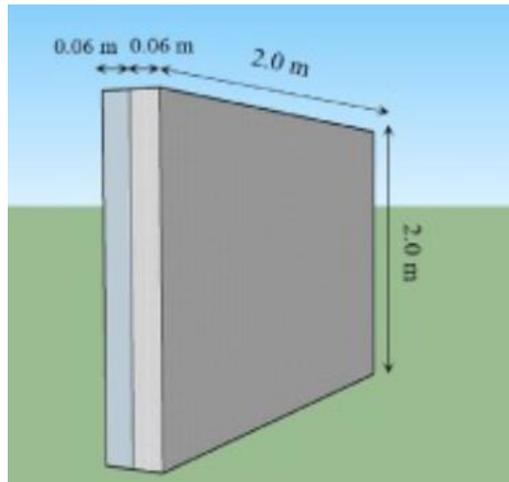


Figura 26. Vista esquemática del muro compuesto [2]

El experimento se lleva a cabo en una cabina construida en el campo, expuesta a condiciones climáticas reales. En la Figura 27 se representan los datos recogidos del experimento en cuanto a la temperatura medida en la sección transversal del muro en ambos supuestos -con y sin adición de PCM-.

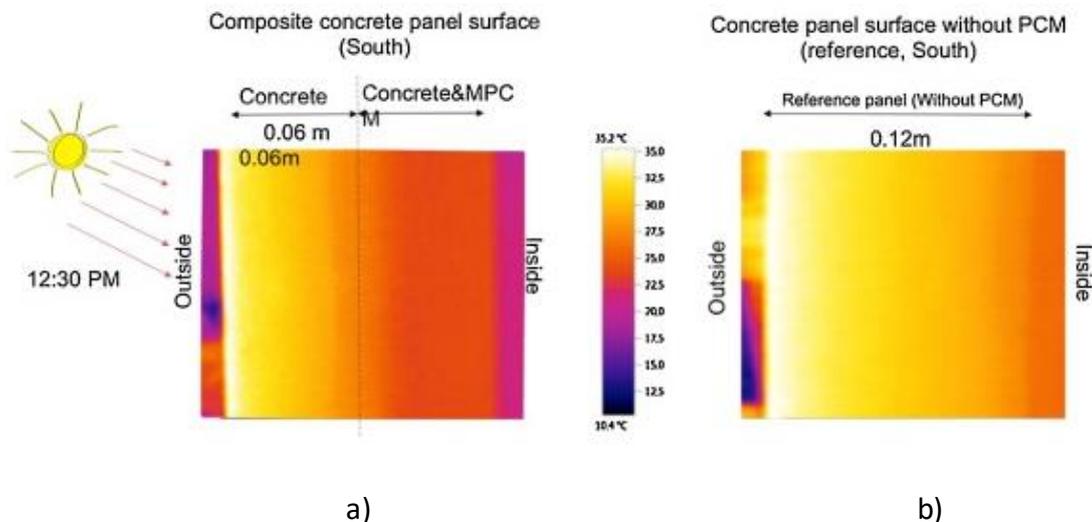
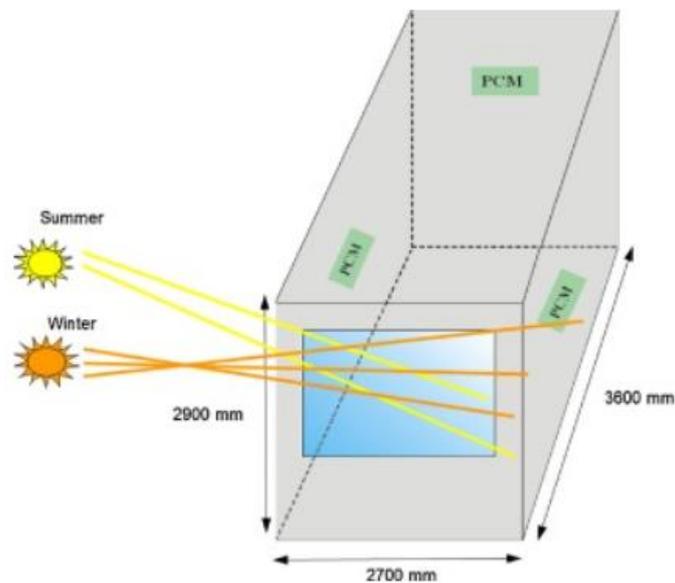


Figura 27. Temperatura en sección transversal. (a) muro compuesto con micro-PCM. (b) muro sin micro-PCM [2]

Donde ya puede apreciarse una notable diferencia en las temperaturas en la superficie interna del muro en ambos supuestos. Por supuesto la adición del PCM ha supuesto la regulación de dicha temperatura.

Los autores llevaron a cabo también una simulación numérica haciendo uso del software TRNSYS. El propósito de la simulación fue determinar el beneficio en cuanto a criterios de consumo energético suponiendo la adición de diferentes materiales PCM, analizando la capacidad de acumulación térmica del edificio. Por lo tanto, para el análisis se utilizaron diferentes materiales PCM con diferentes proporciones, como se detallará más adelante.

La simulación se ejecutó sobre una oficina comercial típica, con un volumen de  $28.2 \text{ m}^3$  y una superficie habitable de  $9.72 \text{ m}^2$  y una superficie de aperturas (en forma de ventana) de  $1.84 \text{ m}^2$ . Estas dimensiones se muestran en la Figura 28:



*Figura 28. Modelo básico oficina típica [2]*

Las paredes o muros, se tratan como muros compuestos. Las propiedades de las paredes exterior e interior, respectivamente, se exponen a continuación -Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5-

<b>Material</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>	<b>Conductividad térmica (W/mk)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor específico (J/kgK)</b>
Material de fachada	85	1,4	2200	940
Lana de vidrio	140	0,037	80	840
Hormigón armado	100	1,7	2500	840
Yeso	5	1	1800	840

*Tabla 3. Propiedades termo-físicas de pared exterior [10]*

<b>Material</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>	<b>Conductividad térmica (W/mk)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor específico (J/kgK)</b>
Lámina	1	1	1800	840
Relleno	150	Tabla 6	Tabla 6	Tabla 6
Lámina	1	1	1800	840

*Tabla 4. Propiedades termo-físicas de pared interior [10]*

<b>Material</b>	<b>Conductividad térmica (W/mk)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor específico (J/kgK)</b>
Aluminio	203	2700	940
Lana TVF1	0,04	16	840
Poliuretano P40	0,035	40	1380

*Tabla 5. Propiedades termo-físicas del relleno [10]*

En definitiva, se lleva a cabo un análisis paramétrico, del que pudieron sacar conclusiones sobre la influencia de:

- Material de pared: Lana o panel de poliuretano.
- Tipo de PCM utilizado: SP22A4, SP20A19, RT20 y C21.
- Porcentaje de PCM.

Los resultados y conclusiones arrojados por dichas simulaciones fueron los siguientes:

En primer lugar se comenta la *influencia del tipo de material de relleno* del muro compuesto. En la Figura 29 se observa que existe una diferencia de alrededor de 12 kWh/día (22% en términos porcentuales), seguramente debido a la diferencia de conductividad térmica entre ambos materiales.

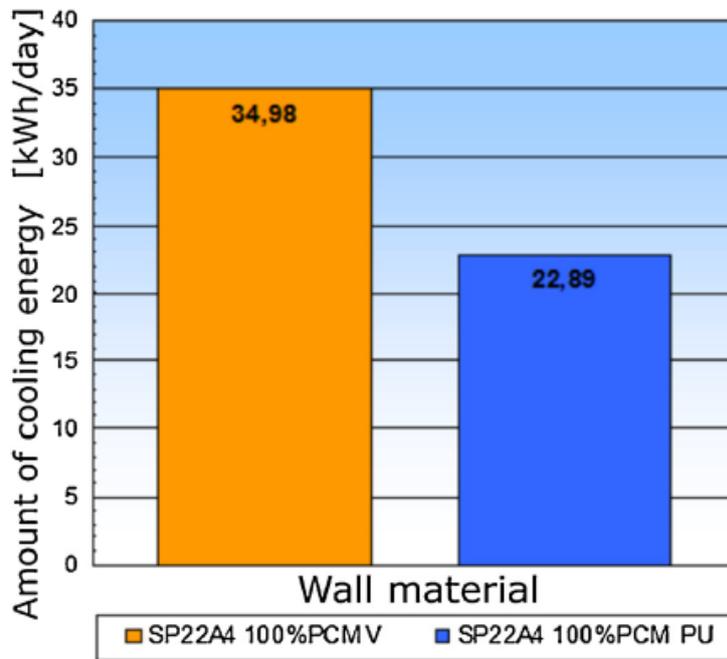


Figura 29. Influencia del material de relleno en la energía de refrigeración [10]

Otro de los parámetros que se estudia es la *variación del tipo de PCM utilizado*, dejando fijos el resto de parámetros del problema -Figura 30-.

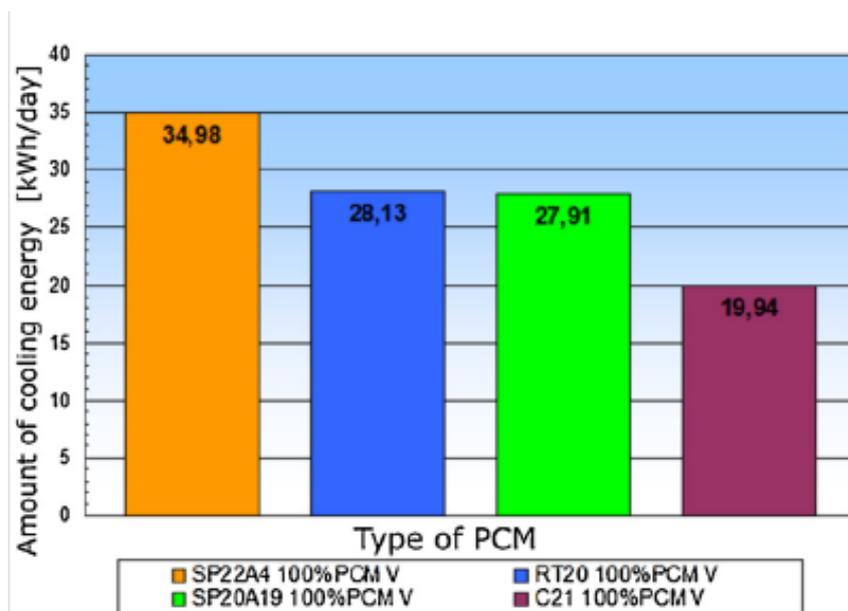


Figura 30. Influencia del tipo de PCM en la energía de refrigeración [10]

Se concluye que la capacidad de acumulación de energía térmica se ve afectada especialmente por el calor latente y su temperatura de fusión. Como podemos ver en la Figura 30, el SP22A4 es el PCM que mayor capacidad de absorción de energía térmica, y por lo tanto el consecuente ahorro energético conlleva. Si analizamos las propiedades descritas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, nos damos cuenta de que se trata del material con mayor  $T^a$  fusión = 24 °C, y el segundo mayor valor de calor latente: Calor latente (kJ/kg) = 165.

Por último se analiza la influencia de la proporción de PCM en el muro. Dicho efecto se puede observar en la Figura 31.

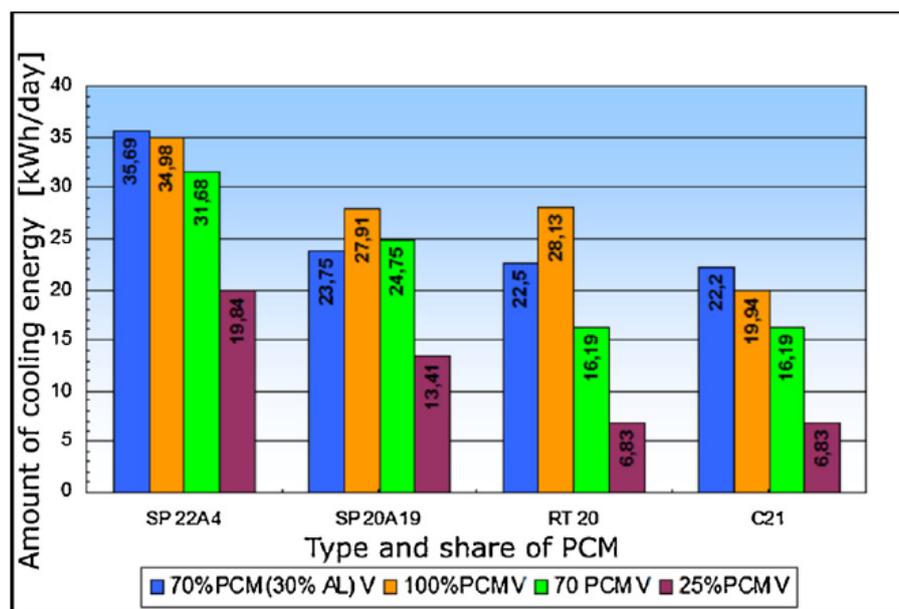


Figura 31. influencia de la proporción y tipo de PCM en la capacidad de absorción de energía [2]

Resulta evidente la influencia de la proporción del PCM en la capacidad de almacenamiento energético, ya que la proporción de PCM está indirectamente relacionada con la masa de PCM, por lo que se podría concluir como regla generalizada que a mayor cantidad de PCM mayor almacenamiento energético. Pero no siempre resulta ser así, ya que no es el único factor influyente, ya se ha visto que por ejemplo la conductividad térmica también tiene un peso importante.

### 3. Objetivos.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es llevar a cabo un estudio que permita obtener o proponer materiales no convencionales aplicables al ámbito de la construcción, y a su vez dar respuesta, a si la aplicación de los mismos, da lugar a una situación ventajosa en cuanto a términos de eficiencia energética respecto al uso de materiales de construcción convencionales.

Tras una revisión al “Estado del arte” disponible en relación a estas tecnologías aún incipientes, clasificaremos el uso de los PCMs en dos categorías principales.

En primer lugar, aquellos casos en los que la manera de incluir dichos materiales es la microencapsulación.

Por otro lado se destaca el empleo de capas de PCM utilizadas directamente como material aislante, por ejemplo, como si en un muro compuesto se añadiera una capa interior compuesta por un PCM, o se confeccionaran los alojamientos oportunos para habilitar que el PCM quedara embebido en dicho muro.

Todas ellas resultan válidas e interesantes de estudio, no obstante, este documento se centrará en la adición de la capa intermedia de PCM como material aislante en un muro compuesto. En concreto se comparará el uso de cerramientos basados en paneles sándwich convencionales, frente a paneles sándwich en los cuales su capa intermedia es un PCM. Esta comparativa se acometerá en dos modelos de distinta geometría, dimensiones y necesidades energéticas, como son una vivienda unifamiliar y un edificio industrial.

Además se evaluarán y contrastarán resultados de carga energética para el diseño de calefacción y refrigeración de los modelos, temperaturas en las superficies exterior e interior del cerramiento y ahorro económico, para todos los tipos de PCMs disponibles en la base de datos de DesignBuilder. Los cuales influyen en los resultados, y nos dan una idea del comportamiento de los mismos en función del espesor de la capa, y de su temperatura de cambio de fase. Esto se explicará con más detalle en capítulos posteriores.

Como objetivo -aunque no principal pero necesario para la investigación- cabe destacar el aprendizaje en el uso del software de modelado y simulación “DesignBuilder” el cual incluye familiarizarse con aspectos como el diseño de la geometría, definición de condiciones de contorno en base a datos climatológicos, definición de nuevos materiales, variación de espesores, control de propiedades termo-físicas y otros parámetros, ejecución de simulaciones y análisis de resultados.

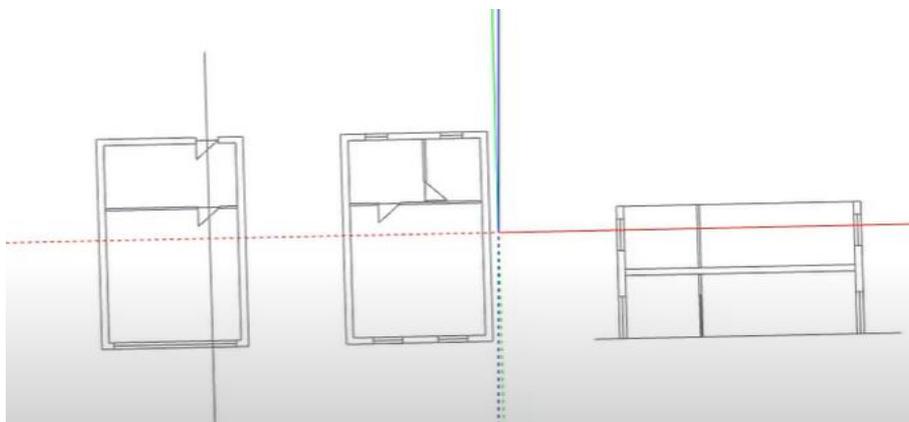
## 4. Metodología

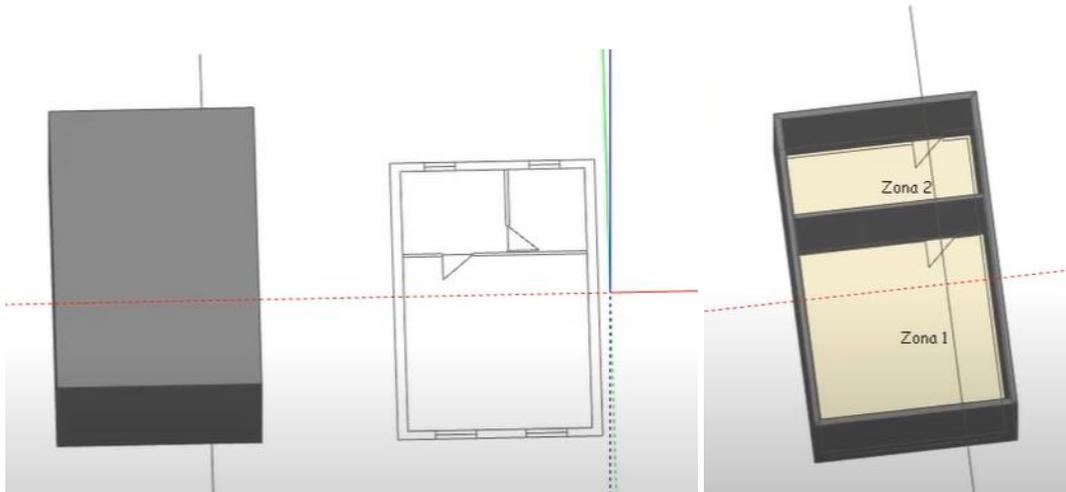
### 4.1. Simulación

Para evaluar la eficiencia energética de los materiales de cambio de fase respecto a otros materiales de construcción convencionales, se ha utilizado el software DesignBuilder, que utiliza los datos energéticos procedentes de Energyplus para realizar simulaciones adaptadas al modelo geométrico diseñado.

#### 4.1.1. Modelos geométricos

El primer paso para comenzar a trabajar con DesignBuilder es la generación de un modelo geométrico. Para realizar el diseño, DesignBuilder no sólo consta de plantillas de modelos geométricos típicos, sino que permite importar archivos en formato CAD o DXF que sirvan de base para ir creando los muros, las ventanas, las cubiertas, particiones, puertas, etc. En la Figura 32 se muestra el proceso de creación de las particiones para uno de los modelos creados.





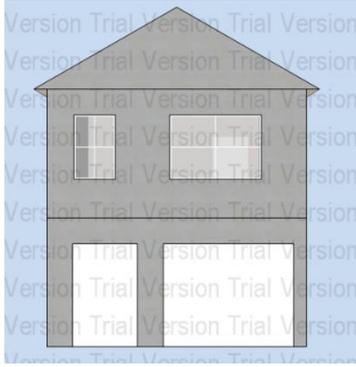
*Figura 32. Modelado en planta de geometría en DesignBuilder*

Además, para cada uno de estos elementos se pueden añadir infinidad de detalles estructurales de manera que el modelo quede lo más semejante posible a la realidad, así como otros detalles que afectan a la simulación energética. Un ejemplo de esto es el porcentaje de abertura de puertas y ventanas. Estas herramientas se pueden usar distintivamente por zonas del modelo, o definirse de manera conjunta para todo el edificio.

Para moverse entre zonas, basta con seleccionar la deseada en la jerarquía que se presenta en la parte derecha superior de la ventana principal, y que se muestra en la Figura 34. En cuanto a la nomenclatura, por niveles jerárquicos el programa asigna por defecto la denominación “bloque” a cada planta, y “zona” a cada espacio separado por particiones.

Los modelos con los que se va a llevar a cabo el estudio de eficiencia energética son dos: un modelo de vivienda unifamiliar de dos plantas, cuya geometría se presenta en la Figura 33, y un modelo de un edificio industrial, también representado en la Figura 37.

➤ *Modelo de vivienda unifamiliar*



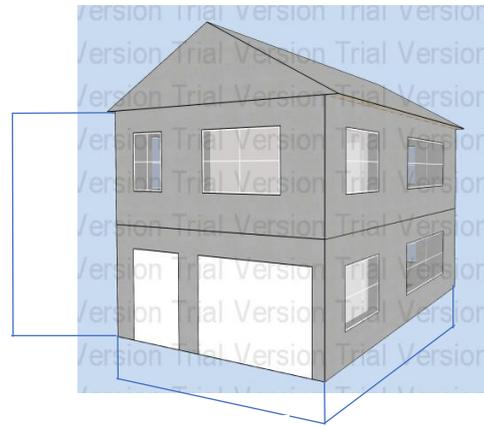
Alzado



Perfil

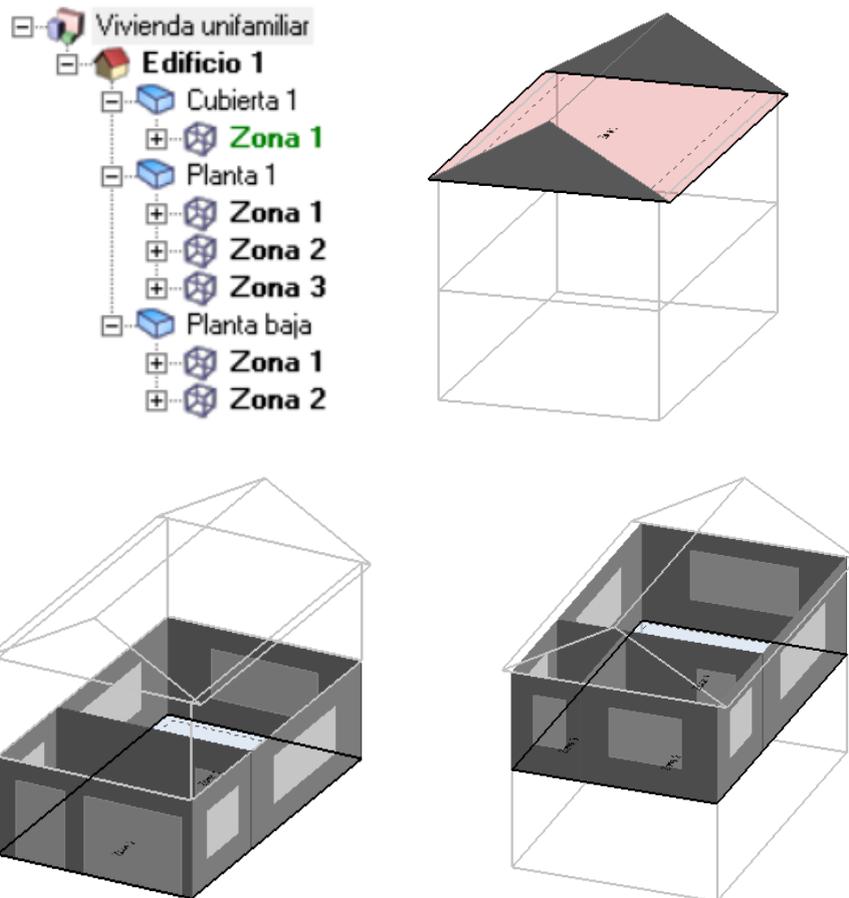


Planta



Vista en axonométrico

*Figura 33. Modelo de vivienda unifamiliar*



*Figura 34. Árbol jerárquico para acceder a las distintas plantas y zonas del edificio*

La planta baja consta de una primera zona de 39 m<sup>2</sup> y una segunda de 21 m<sup>2</sup>, y una primera planta con tres zonas, de 39, 14 y 7 m<sup>2</sup>, lo que hacen una vivienda de 120 m<sup>2</sup> habitables en total. La geometría de las ventanas se muestra en la Figura 35, donde también se aprecia el porcentaje de acristalamiento en los muros, que es del 30%.

Un detalle a tener en cuenta es la influencia de la abertura de las ventanas, que en todas las simulaciones se ha fijado al 5%. Variar este parámetro supone una variación en las cargas de refrigeración y calefacción.

Vivienda unifamiliar, Edificio 1	
Modelo Actividad Cerramientos Aberturas Iluminación HVAC Generación Misceláneos CFD	
Plantilla de Acristalamiento	
<b>Plantilla</b>	<b>Plantilla de acristalamiento del proyecto</b>
Ventanas Exteriores	
Tipo de acristalamiento	Acristalamiento exterior del proyecto
<b>Distribución de acristalamiento</b>	<b>Preferred height 1.5m. 30% glazed</b>
Dimensiones	
Tipo	3-Acristalamiento no continuo (altura preferente)
Porcentaje de acristalamiento (%)	30,00
Altura de ventanas (m)	1,50
Espaciamiento de ventanas (m)	5,00
Altura del alféizar (m)	0,80
Profundidad de retranqueo exterior (m)	0,000

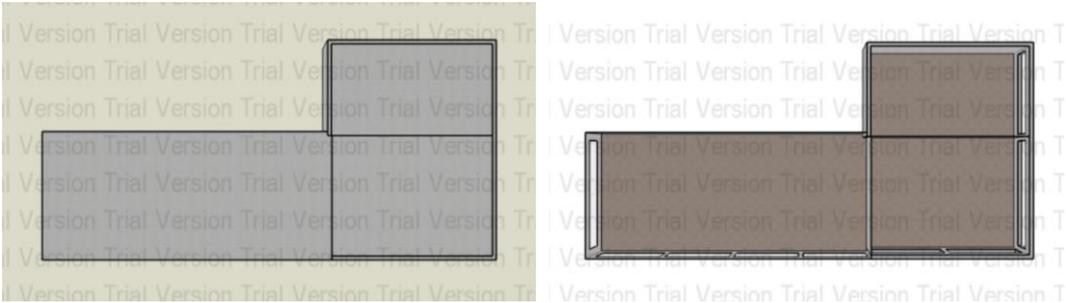
Figura 35. Introducción de datos de acristalamiento y aberturas

En la Figura 36 se detalla un código de colores en el que se expone el material de construcción de cada elemento del modelo. Será en los muros y en la cubierta donde se cambie el material en cada simulación. En este caso se observan las denominaciones “muro poliuretano” y “PCM”.



Figura 36. Vista vivienda unifamiliar en código de colores

➤ Edificio industrial



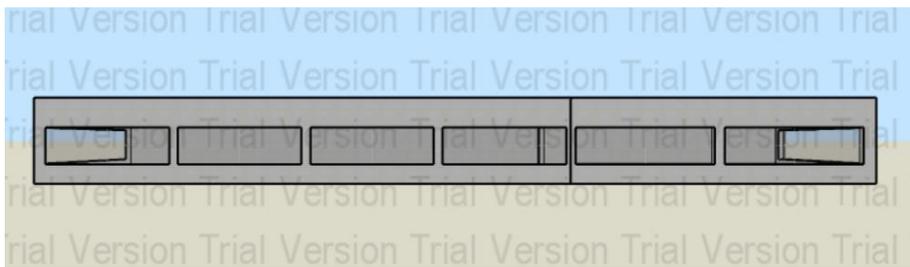
Planta



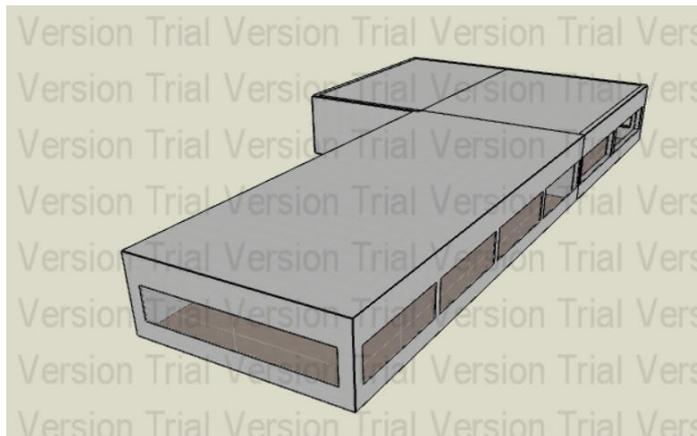
Perfil izquierdo



Perfil izquierdo



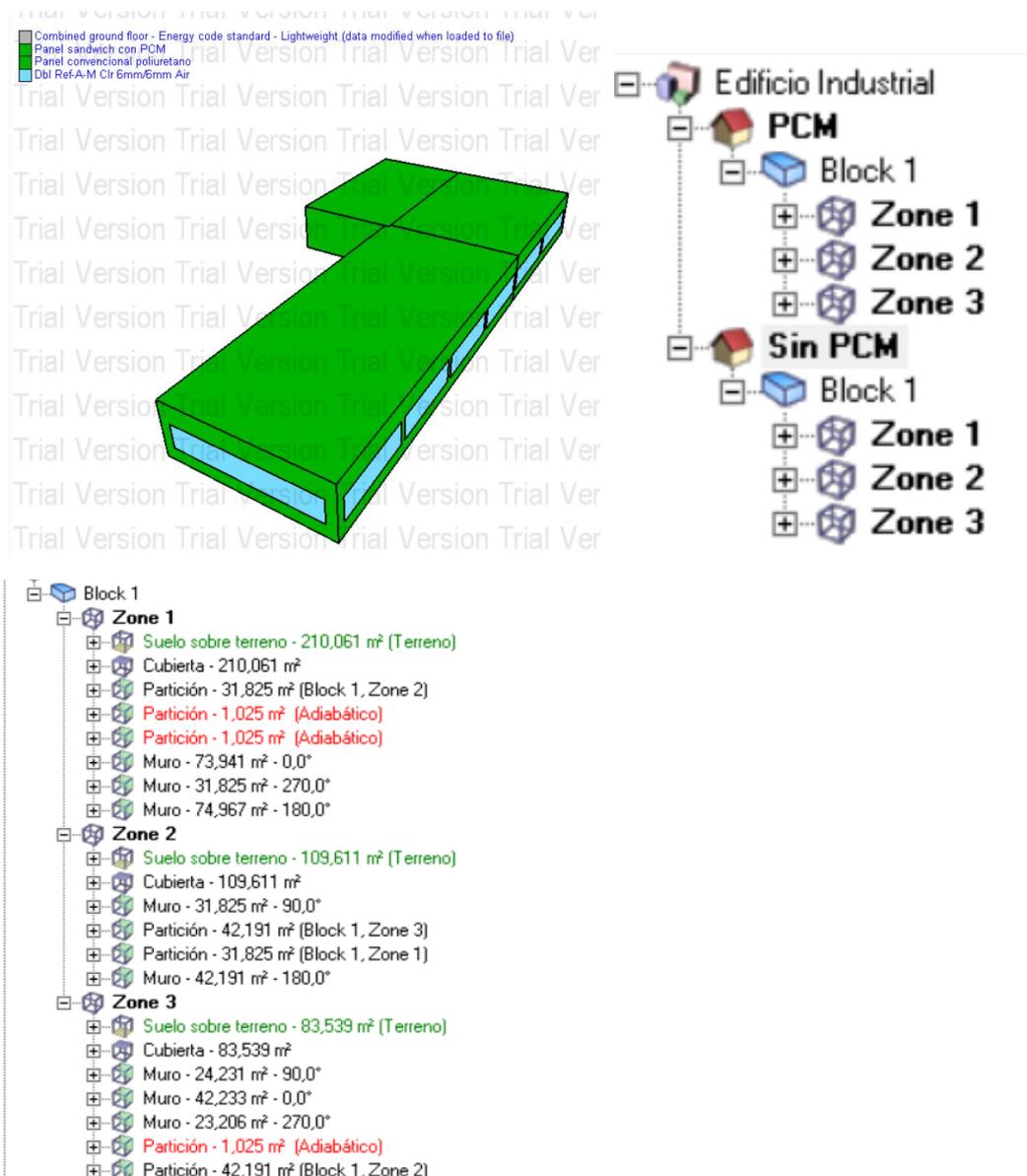
Alzado



Vista en axonométrico

*Figura 37. Modelo de edificio industrial*

La nave consta de tres zonas de 210, 110 y 84 m<sup>2</sup>, lo que hacen una superficie total de 404 m<sup>2</sup>. Para este modelo se realizó un solo archivo donde se diseñaron dos naves exactamente iguales, por eso en la Figura 38 se observa que las leyendas de colores indican tanto “Panel sándwich con PCM” como “Panel sándwich con poliuretano”, correspondientes a cada estudio. Además, puesto que cada zona tiene definida una partición, a pesar de que es común a dos zonas, se ha establecido una de ellas como adiabática, evitando así que se realice un cálculo con una partición de espesor doble.



**Block 1**

- Zone 1**
  - Suelo sobre terreno - 210,061 m<sup>2</sup> (Terreno)
  - Cubierta - 210,061 m<sup>2</sup>
  - Partición - 31,825 m<sup>2</sup> (Block 1, Zone 2)
  - Partición - 1,025 m<sup>2</sup> (Adiabático)
  - Partición - 1,025 m<sup>2</sup> (Adiabático)
  - Muro - 73,941 m<sup>2</sup> - 0,0°
  - Muro - 31,825 m<sup>2</sup> - 270,0°
  - Muro - 74,967 m<sup>2</sup> - 180,0°
- Zone 2**
  - Suelo sobre terreno - 109,611 m<sup>2</sup> (Terreno)
  - Cubierta - 109,611 m<sup>2</sup>
  - Muro - 31,825 m<sup>2</sup> - 90,0°
  - Partición - 42,191 m<sup>2</sup> (Block 1, Zone 3)
  - Partición - 31,825 m<sup>2</sup> (Block 1, Zone 1)
  - Muro - 42,191 m<sup>2</sup> - 180,0°
- Zone 3**
  - Suelo sobre terreno - 83,539 m<sup>2</sup> (Terreno)
  - Cubierta - 83,539 m<sup>2</sup>
  - Muro - 24,231 m<sup>2</sup> - 90,0°
  - Muro - 42,233 m<sup>2</sup> - 0,0°
  - Muro - 23,206 m<sup>2</sup> - 270,0°
  - Partición - 1,025 m<sup>2</sup> (Adiabático)
  - Partición - 42,191 m<sup>2</sup> (Block 1, Zone 2)

Figura 38. Vista edificio industrial en código de colores

#### 4.1.2. Datos climatológicos

Una vez se han diseñado los modelos geométricos sobre los que se va a trabajar, es necesario definir la situación de los edificios, para que el programa disponga de las condiciones de contorno de la simulación.

Una de las grandes ventajas que ofrece DesignBuilder son los ficheros climáticos, que constan de los datos climáticos de la zona en la que se va a situar el modelo y con los que se asegura una mayor veracidad de los datos obtenidos de la simulación.

El fichero climático utilizado en ambos modelos es el de la Región de Murcia, donde se ha supuesto que se encontrarían los edificios a estudio. El fichero se denomina ESP\_MURCIA\_SWEC, y tiene como valores característicos los que se muestran en la Figura 39. Los valores de ubicación de los edificios se han dejado por defecto.

The image shows a software interface with two main panels. The top panel, titled 'Datos de Región', contains configuration fields for the site location and details. The bottom panel, titled 'Informe de datos (No editable)', displays climate data for the selected file 'ESP\_MURCIA\_SWEC', including general information and seasonal data for Summer and Winter.

Datos de Región	
Plantilla	MURCIA
Ubicación	
Latitud (°)	38,00
Longitud (°)	-1,17
Zona climática ASHRAE	3A
Detalles del Sitio	
Elevación sobre el nivel del mar (m)	62,0
Nivel de exposición al viento	2-Normal
Orientación (°)	0,0

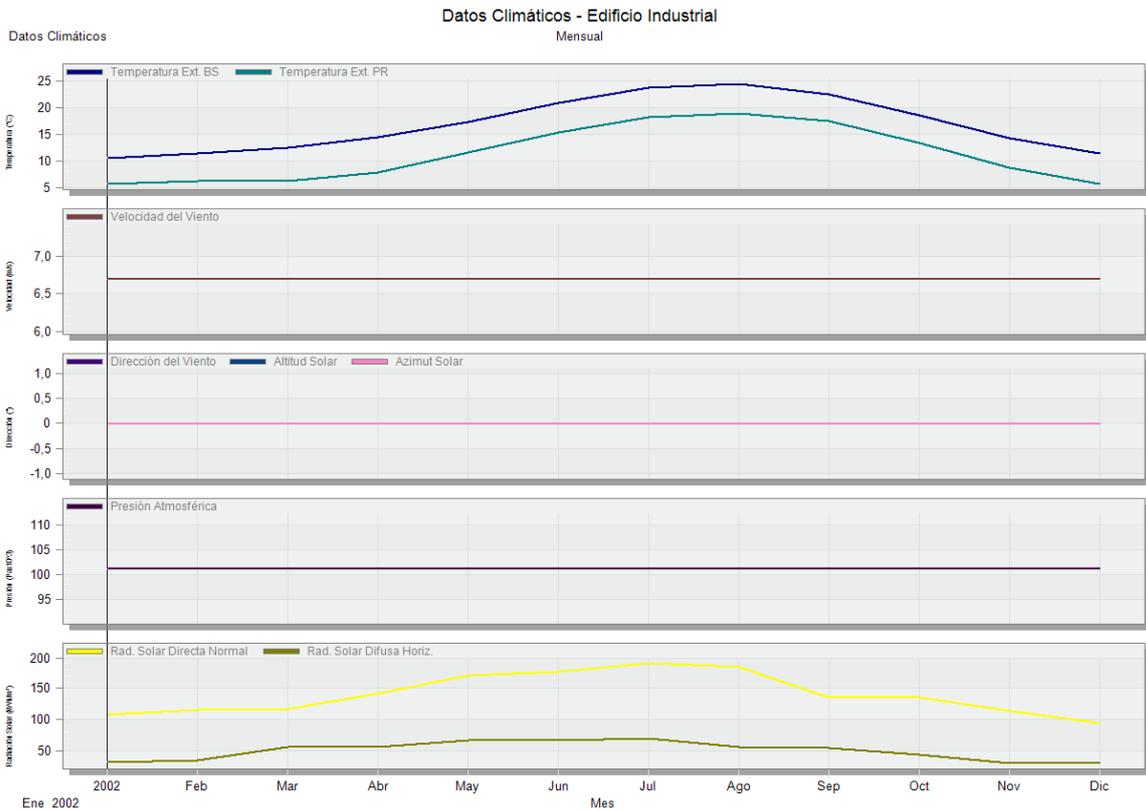
Informe de datos (No editable)	
<b>General</b>	
ESP_MURCIA_SWEC	
Fuente	SWEC
País	ESPAÑA
Archivo	ESP_MURCI
<b>Detalles</b>	
Latitud (°)	37,79
Longitud (°)	-0,80
Identificador de estación ...	084300
Zona climática ASHRAE	3A

Verano	
Mes inicial del verano	Jul
Mes final del verano	Sep
Semana cálida extrema, inicio	Jul 29
Semana cálida típica, inicio	Aug 26
Grados día de refrigeraci...	-
Invierno	
Mes inicial del invierno	Jan
Mes final del invierno	Mar
Semana fría extrema, inicio	Jan 29
Semana fría típica, inicio	Feb 26
Grados día de calefacció...	-

Figura 39. Datos del sitio (emplazamiento del edificio)

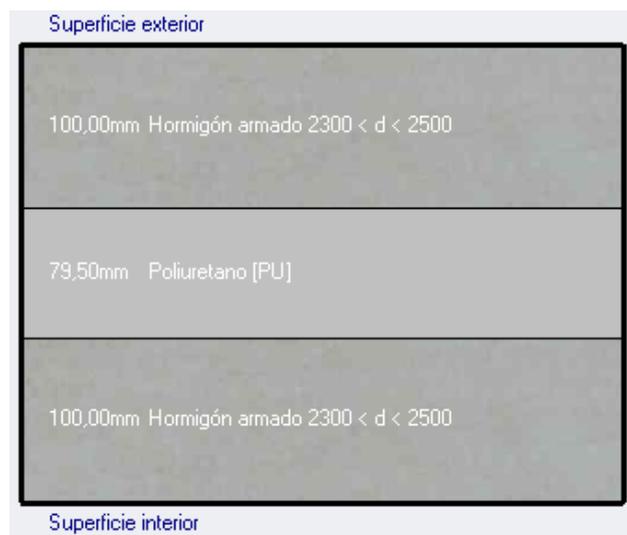
En la Figura 40 aparecen valores representativos del clima de la zona que son interesantes para este estudio. Valores como la potencia de radiación solar, temperaturas externas al edificio y velocidad y dirección del viento serán determinantes a la hora de la utilización de uno u otro material de cambio de fase.



*Figura 40. Evolución de datos climáticos anual*

#### 4.1.3. Paneles en cerramientos

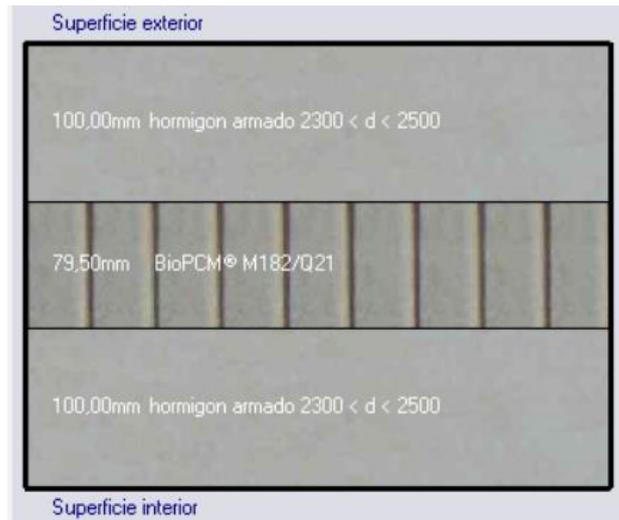
El primero de ellos se denomina “muro poliuretano” y presenta la estructura convencional de un panel sándwich de hormigón, que consta de 3 capas:



*Figura 41. Estructura panel de poliuretano*

- Capa exterior: 0,1 m de espesor hormigón armado 2300 < d < 2500.
- Capa intermedia: 0,0795 m de espesor de poliuretano como material aislante del cerramiento.
- Capa interna: 0,1 m de espesor hormigón armado 2300 < d < 2500.

El segundo material de construcción sometido a estudio, es el denominado “Panel sándwich con PCM”, que en este caso consta de las siguientes 3 capas:



*Figura 42. Estructura panel con PCM*

- Capa exterior: 0,1 m de espesor hormigón armado 2300 < d < 2500
- Capa intermedia: 0,0795 m de espesor de BioPCM M182/Q21 como material aislante del cerramiento.
- Capa interna: 0,1 m de espesor hormigón armado 2300 < d < 2500

De la misma manera que se muestra en la Figura 42, se van a localizar los diferentes PCMs que se encuentran en DesignBuilder.

En la Figura 43 se muestra un ejemplo de la pestaña cerramientos de uno de los modelos, en los que el material de muros, cubiertas y particiones era BioPCM M182 Q21. En la Figura 44 se muestra cómo el programa ofrece la posibilidad de cambiar de material por capas utilizando el cuadro de la derecha superior, a la vez que muestra más abajo las propiedades de cada uno de ellos cuando se selecciona.

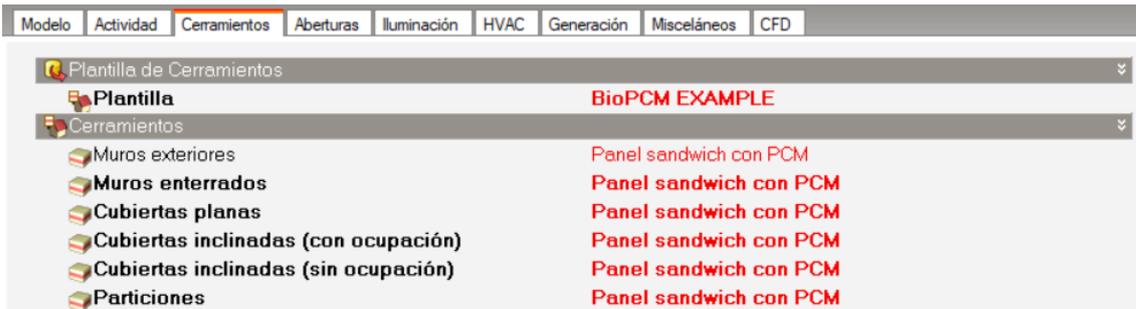


Figura 43. Pestaña de cerramientos en DesignBuilder

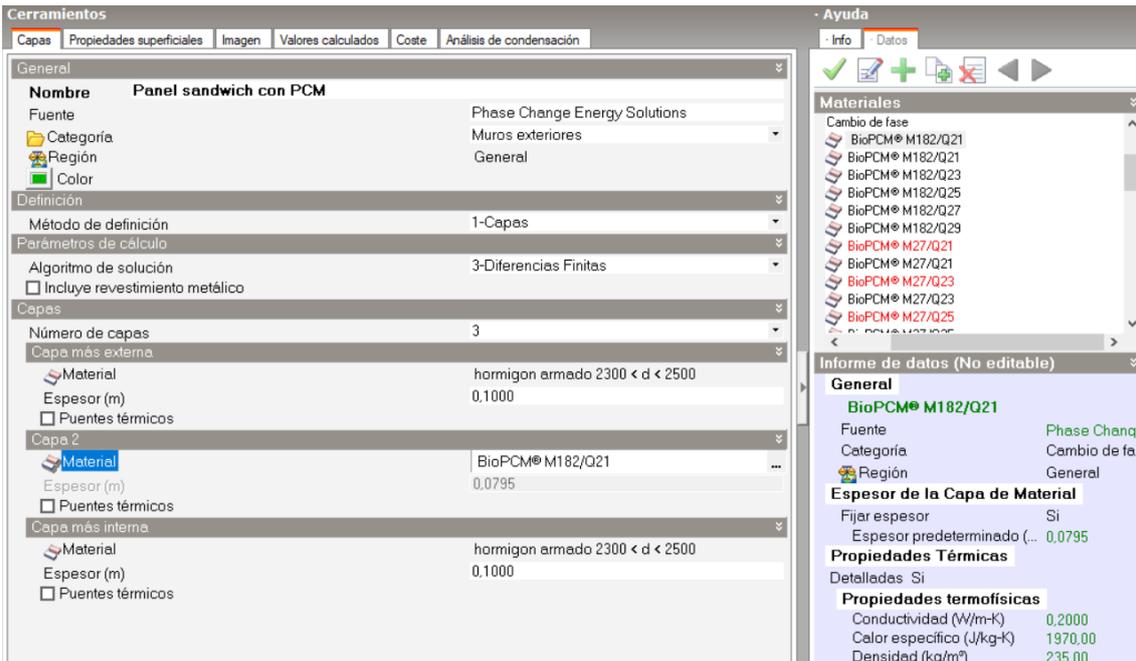


Figura 44. Detalle y edición de materiales que componen el cerramiento

Además de las propiedades termofísicas, el fichero ofrece 16 puntos de la curva Temperatura-Entalpía de cada material. Por otro lado, ofrece el coste de cada material por unidad de área, masa y volumen.

En nuestro caso, todos los cerramientos de ambos modelos están formados por dos capas exteriores de hormigón de espesor fijo y una intermedia de un material aislante que va cambiando con las simulaciones, tanto en material como en espesor. Por lo tanto, también va cambiando el coeficiente de transferencia de calor, U. Sin embargo, éste es calculado por DesignBuilder en cada simulación como se muestra en la Figura 45.

Espesor (m)	0,2795
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m <sup>2</sup> -K)	240,0000
Límite superior de resistencia (m <sup>2</sup> -K/W)	0,654
Límite inferior de resistencia (m <sup>2</sup> -K/W)	0,654
Valor U de superficie a superficie (W/m <sup>2</sup> -K)	2,064
Valor R (m <sup>2</sup> -K/W)	0,654
<b>Valor U (W/m<sup>2</sup>-K)</b>	<b>1,528</b>

*Figura 45. Coeficiente global de transmisión del calor*

Además, el programa ofrece la resistencia térmica de la totalidad del muro, con lo que es fácilmente demostrable la relación entre ellos usando la definición del coeficiente de transferencia de calor global:

$$U \left( \frac{W}{m^2 K} \right) = \frac{1}{R_T} \rightarrow \frac{1}{0,654} = 1,528$$

#### 4.1.4. Fases de la simulación

En una primera fase de estudio, se llevarán a cabo dos simulaciones por modelo: una donde se utilizará como material estructural un panel sándwich convencional, y otra con un panel sándwich que contendrá el BioPCM M182 Q21. El objetivo será determinar la influencia de la utilización de un panel convencional respecto a uno con un material de cambio de fase, así como determinar en cuál de los dos modelos sería más apropiada su utilización.

En una segunda fase de estudio, se pretende comparar para un solo modelo, el del edificio industrial, los distintos tipos de BioPCM<sup>®</sup> que el simulador pone a disposición del usuario. Esta a su vez constará de dos fases:

- Se compararán los distintos tipos de BioPCM de una serie, donde se mantiene el espesor, pero varía la curva Temperatura-Entalpía.
- Para un material de temperatura de fusión constante, se estudia la repercusión que causa aumentar el espesor de la capa aislante.

#### 4.1.5. Datos de la simulación

Una vez se han asignado los materiales de edificación a los modelos geométricos y se han definido los datos climáticos, se está en disposición de definir los parámetros de la simulación.

Al acceder a la pestaña “simulación”, podemos observar un cuadro de diálogo a la izquierda de la pantalla en el cual podemos seleccionar el tipo de datos que queremos obtener, a elegir entre los que se muestran en la Figura 46, calcular “todos”, u otra opción llamada “personalizados”, donde en la pestaña “detallado” se seleccionan de manera individual. Además, el programa permite normalizar los valores por área, una opción muy útil cuando lo que se pretende es estudiar la respuesta del material independientemente de la superficie en la que se utiliza.



Figura 46. Opciones de visualización de datos

Para disponer de todos los datos posibles de la simulación, se ha optado por seleccionar “todos”, y el resto de los valores se eligen dependiendo de si se necesitan datos anuales, mensuales o diarios.

En las opciones de cálculo, se define en la pestaña “general” el periodo de la simulación, como se muestra en la Figura 47, así como los intervalos en los que se ofrecen los resultados. Lo más útil resulta siempre marcar las casillas de mensual, diario y horario, independientemente de los datos que se requieran.

**Opciones de Cálculo**

General Opciones Resultados Administrador de Simulaciones

Descripción del Cálculo

Período de simulación

Desde

Día inicial 1

Mes inicial Ene

Año específico

Año inicial 2021

Hasta

Día final 31

Mes final Dic

Ejecutar simulación para varios años

Intervalos de resultados

Mensual y Período de simulación

Diario

Horario

Sub-horario

*Figura 47. Período de simulación*

En la pestaña de “opciones” que se muestra en la Figura 48, lo más destacable es el tipo de temperatura para consignas, donde la seleccionada es la temperatura del aire en el interior del edificio.

**Opciones de Cálculo**

General Opciones Resultados Administrador de Simulaciones

Opciones de Cálculo

Método de simulación 1-EnergyPlus

Etapas de simulación por hora 2

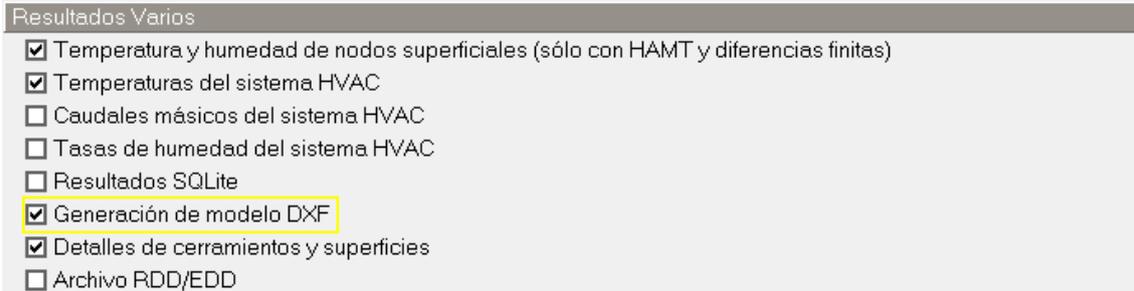
Tipo de temperatura para consignas 1-Temperatura del aire

*Figura 48. Opciones de cálculo. Definición T<sup>a</sup> para consignas*

En la pestaña “resultados”, se marcan las casillas que recogen los datos interesantes para el estudio, entre ellos el índice de Fanger, indicador del confort térmico en la estancia que se explicará en capítulos posteriores. Los marcados para este estudio se muestran en el anexo.

En el apartado de esta pestaña denominado “Tablas de Resumen Mensual” se muestran casillas que serán de gran utilidad cuando se quiere diseñar el sistema HVAC, ya que el software ofrece los consumos pico de Calentamiento y Refrigeración, energía consumida en forma de electricidad o de combustibles como Diesel, gasolina, gas natural, etc.

Por otro lado, en la Figura 49 se observa que es posible seleccionar la opción de generar un archivo DXF, algo muy interesante si se quiere añadir al modelo geométrico algún detalle poco significativo a nivel energético en otro software diferente a DesignBuilder.



*Figura 49. Opción de generar archivo DXF*

Además, es posible ajustar el tiempo en el que tardan en alcanzarse las temperaturas consigna fijadas en los sistemas de calefacción y refrigeración. Los valores que se muestran en la Figura 50 se han dejado por defecto.

Tolerancias de Tiempo con Consignas no Alcanzadas	
Tolerancia de tiempo con consigna de calefacción no alcanzada	1,11
Tolerancia de tiempo con consigna de refrigeración no alcanzada	1,11

*Figura 50. Tolerancias de tiempo con consignas no alcanzadas*

## 4.2. Materiales

Antes de mostrar los resultados fruto de las simulaciones realizadas, es conveniente ahondar un poco en ciertas propiedades de los materiales utilizados. Como se ha comentado en este capítulo, los paneles sándwich de los que van a estar compuestos los cerramientos están formados por tres tipos de materiales: hormigón armado, poliuretano y materiales de cambio de fase de la gama BioPCM®.

El hormigón armado se ha definido en capítulos anteriores y su composición y geometría no varía en las simulaciones. Por otro lado, el poliuretano y los materiales de cambio de fase se han establecido en el centro de los paneles sándwich como aislantes térmicos.

El poliuretano proyectado es el material por excelencia empleado en el aislamiento térmico. Es un polímero que se obtiene de bases hidroxílicas combinadas con diisocianatos (en general se utiliza diisocianato de tolueno -TDI- o diisocianato de difenilmetano -MTI-).

Posee una baja densidad y una estructura que le confiere el valor de conductividad térmica más bajo de los materiales aislantes que se utilizan de manera habitual en construcción. Esto le permite alcanzar las exigencias de aislamiento térmico del Código Técnico de Edificación (CTE), con el mínimo espesor. Esta capacidad de aislamiento se mantiene a lo largo de toda la vida útil del edificio. Normalmente se utiliza una capa sin juntas, ni puentes térmicos, adherida por si misma de manera hermética y se aplica sobre cualquier tipo de superficie que este limpia y seca.

Por otro lado, la gama de productos BioPCM® recoge una familia patentada de materiales de cambio de fase desarrollados por Phase Change Solutions (PCS). Estos productos se pueden diseñar para almacenar y liberar energía a cualquier temperatura entre los -75 y los 125 °C, con el fin de maximizar el rendimiento energético y minimizar el impacto ambiental. Respecto a su composición, según la información disponible en <https://phasechange.com/biopcm>, se trata de materiales de origen vegetal.

Los productos BioPCM® que tiene implementado el programa de simulación son los siguientes:

- Serie M27 (Q21, Q23, Q25, Q27 y Q29) con un espesor de 0,0112 m.
- Serie M51 (Q21, Q23, Q25, Q27 y Q29) con un espesor de 0,0208 m.
- Serie M91 (Q21, Q23, Q25, Q27 y Q29) con un espesor de 0,0371 m.
- Serie M182 (Q21, Q23, Q25, Q27 y Q29) con un espesor de 0,0742 m.

Las series se diferencian en el espesor en que se venden en el catálogo, y las denominaciones Q21, Q23, Q25, Q27 y Q29 dan lugar a materiales con las curvas Temperatura-Entalpía que se representan en la Figura 51.

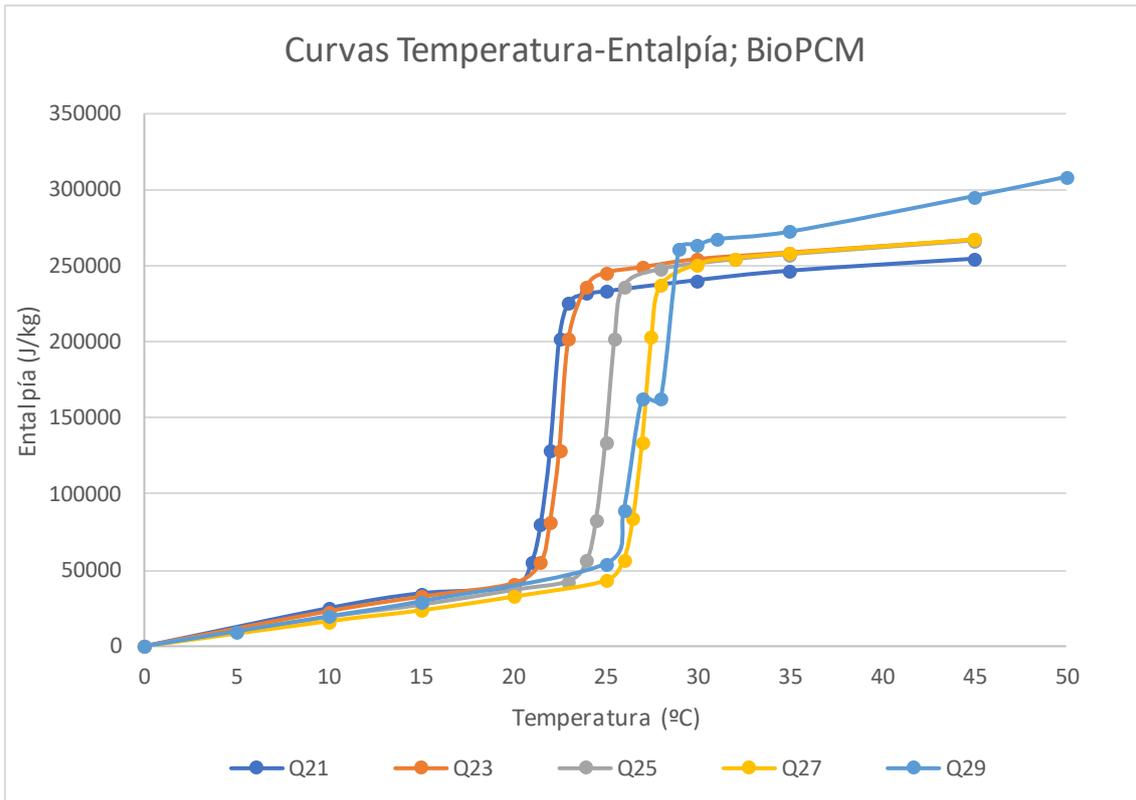


Figura 51. Curvas Temperatura VS Entalpía BioPCMs

Los números de las denominaciones Q21, Q23, Q25, Q27 y Q29 hacen referencia a las temperaturas a las que el material cambia de fase. En consecuencia, estas curvas son de gran utilidad a la hora de seleccionar un material de construcción, sobre todo si se tiene en cuenta el clima en el que se va a edificar.

Las propiedades termo-físicas de estos materiales son:

- Hormigón armado:

Conductividad	2,3 (W/m·K)
Calor específico	1000 (J/kg·K)
Densidad	2400 (kg/m <sup>3</sup> )

- Poliuretano:

Conductividad	0,25 (W/m·K)
Calor específico	1800 (J/kg·K)
Densidad	1200 (kg/m <sup>3</sup> )

- BioPCM©:

Conductividad	0,2 (W/m-K)
Calor específico	1970 (J/kg-K)
Densidad	235 (kg/m <sup>3</sup> )

## 5. Resultados

### 5.1. Estudio comparativo: Poliuretano vs. PCM

Se han llevado a cabo dos simulaciones por modelo: una donde se utiliza como material estructural un panel sándwich convencional, y otra con un panel sándwich que contiene el BioPCM M182 Q21.

Cuando se realiza la simulación seleccionando como datos “todos” y para obtener gráficas y datos en celdas, se obtienen datos de temperaturas, ganancias de calor (que se muestran en la Figura 52) y consumos energéticos. El programa ofrece los consumos de electricidad en aparatos e iluminación, consumos en climatización, temperaturas del aire, radiante, operativa y exterior de Bulbo Seco, transferencia de calor a través de los elementos constructivos y consumos energéticos en calefacción y refrigeración.

De los diferentes puntos desde los que se puede abordar el estudio de comparación entre materiales, se ha elegido comparar las pérdidas en los muros de los edificios entre materiales.

- Vivienda unifamiliar

Con PCM (BioPCM M182/Q21)

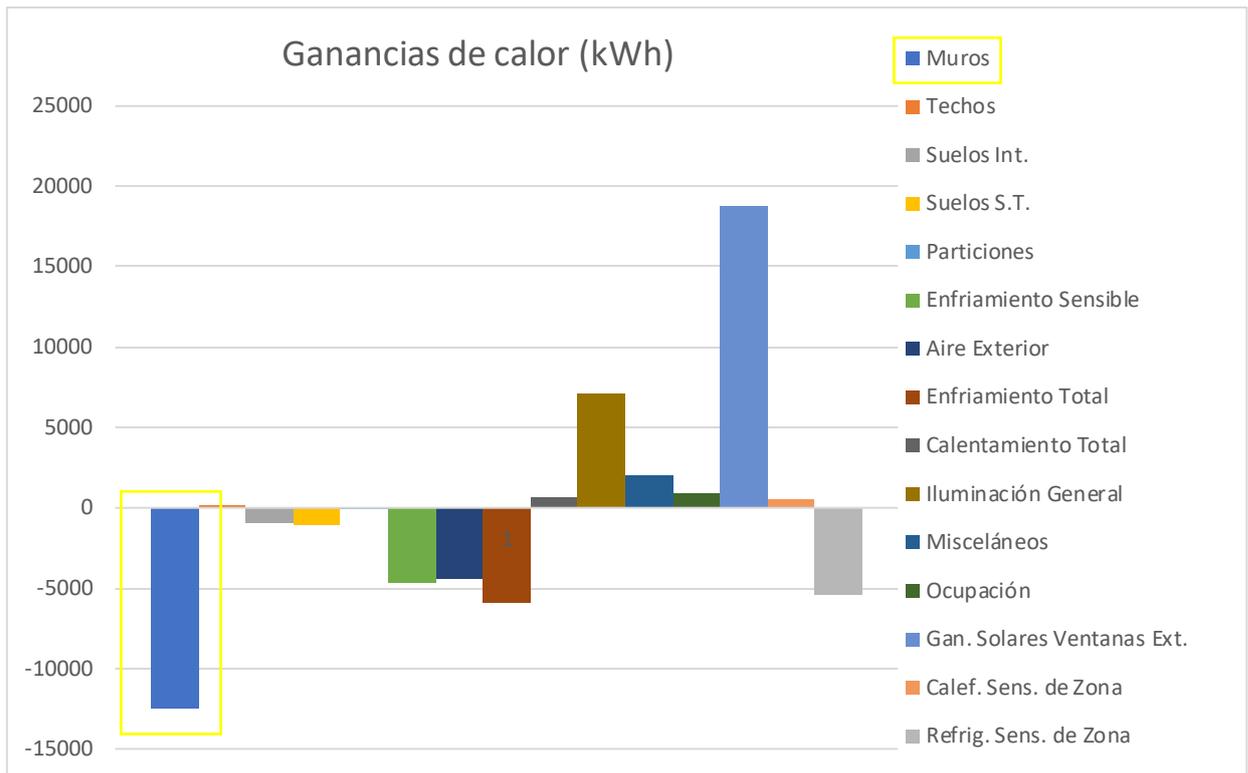


Figura 52. Gráfica de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con BioPCM  
M182/Q21

	Año
Aparatos (Electricidad) (kWh)	1973,40
Iluminación (kWh)	7148,95
Calefacción (Gas) (kWh)	748,05
Refrigeración (Electricidad) (kWh)	3231,85
ACS (Electricidad) (kWh)	782,39
Temperatura del Aire (°C)	24,02
Temperatura Radiante (°C)	24,71
Temperatura Operativa (°C)	24,36
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Muros (kWh)	-12583,94
Techos (kWh)	99,05
Suelos Int. (kWh)	-895,95
Suelos S.T. (kWh)	-1065,74
Particiones (kWh)	-4,65
Aire Exterior (kWh)	-4429,54
Iluminación General (kWh)	7148,95
Misceláneos (kWh)	1973,40
Ocupación (kWh)	951,82
Gan. Solares Ventanas Ext. (kWh)	18773,76
Calef. Sens. de Zona (kWh)	503,98
Refrig. Sens. de Zona (kWh)	-5346,00
Enfriamiento Sensible (kWh)	-4612,23
Enfriamiento Total (kWh)	-5817,34
Calentamiento Total (kWh)	635,84

Figura 53. Valores numéricos de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21

SIN PCM

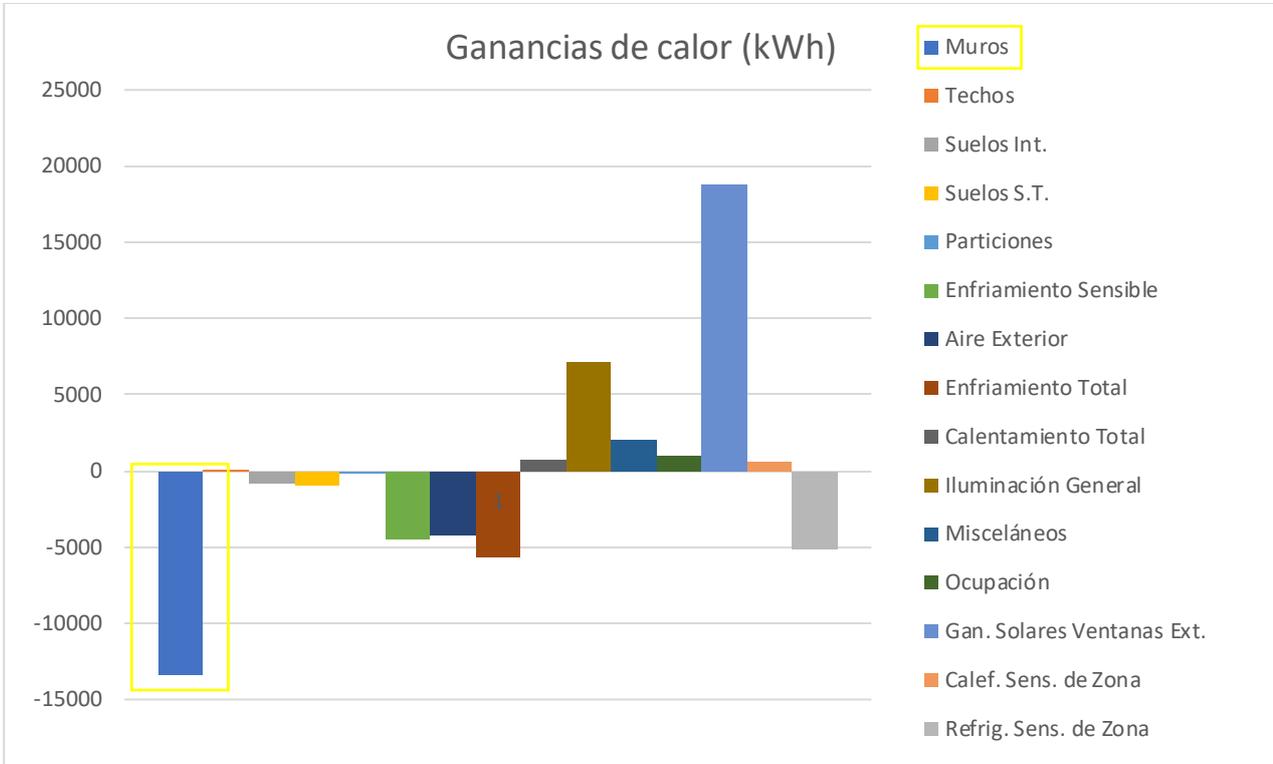


Figura 54. Gráfica de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con panel convencional

La diferencia de pérdidas energéticas en la vivienda unifamiliar al utilizar como material aislante un material de cambio de fase es de 783,39 kWh.

Aparatos (Electricidad) (kWh)	1980,68
Iluminación (kWh)	7173,11
Calefacción (Gas) (kWh)	860,92
Refrigeración (Electricidad) (kWh)	3170,72
ACS (Electricidad) (kWh)	785,06
Temperatura del Aire (°C)	23,74
Temperatura Radiante (°C)	24,37
Temperatura Operativa (°C)	24,06
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Muros (kWh)	-13367,33
Techos (kWh)	91,98
Suelos Int. (kWh)	-854,97
Suelos S.T. (kWh)	-1026,52
Particiones (kWh)	-4,82
Aire Exterior (kWh)	-4254,90
Iluminación General (kWh)	7173,11
Misceláneos (kWh)	1980,68
Ocupación (kWh)	965,16
ian. Solares Ventanas Ext. (kWh)	18791,19
Calef. Sens. de Zona (kWh)	594,48
Refrig. Sens. de Zona (kWh)	-5173,56
Enfriamiento Sensible (kWh)	-4495,65
Enfriamiento Total (kWh)	-5707,30
Calentamiento Total (kWh)	731,79

*Figura 55. Valores numéricos de ganancias de calor. Vivienda unifamiliar con panel convencional*

➤ Edificio industrial

En el caso del edificio industrial, la mayoría del calor se disipa por la cubierta. Esta diferencia con la vivienda unifamiliar reside en la diferencia en las geometrías, ya que en este caso se trata de una sola planta de mayor superficie y que tiene una cubierta plana en lugar de triangular, con lo que los flujos de calor en las estancias son diferentes.

SIN PCM

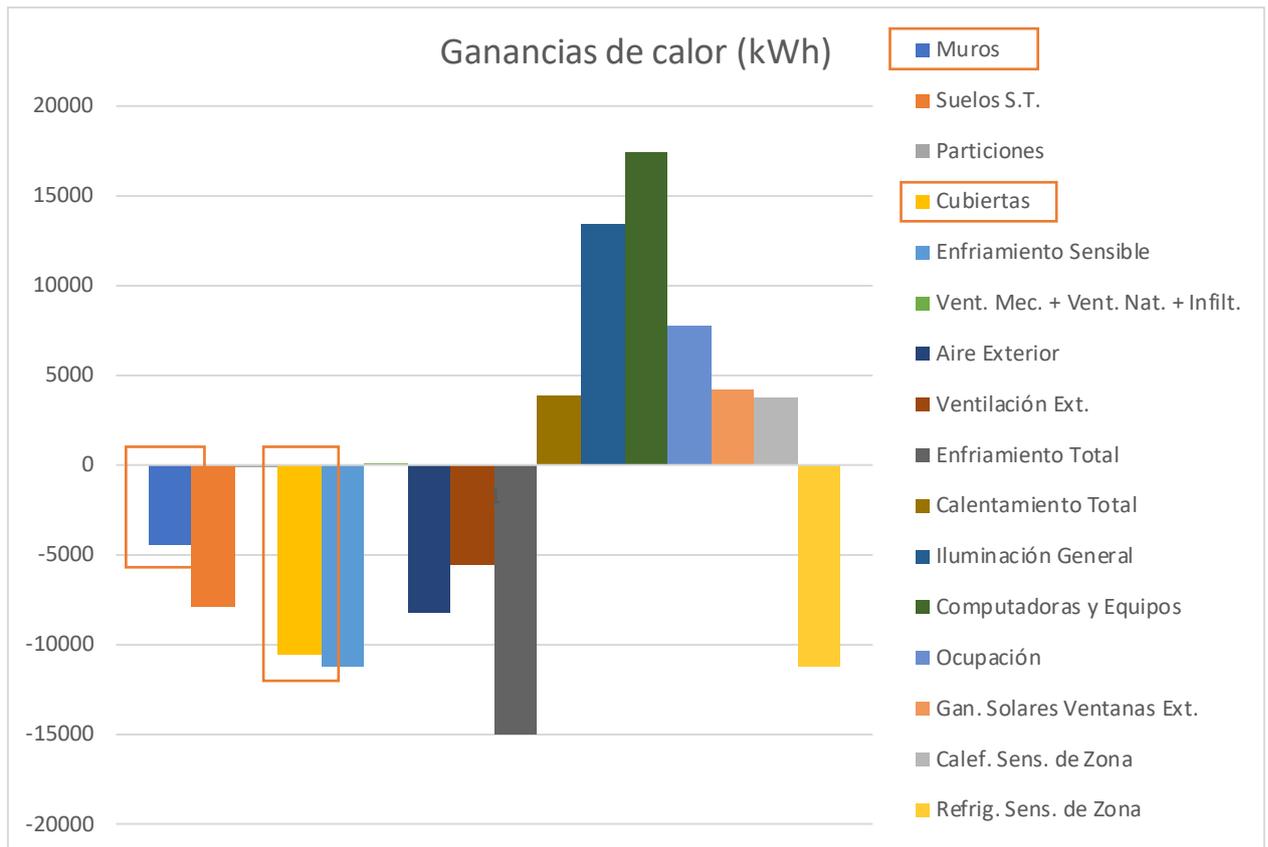


Figura 56. Gráfica de ganancias de calor. Edificio industrial con panel convencional

Se aprecia una diferencia entre las pérdidas de los muros de

Aparatos (Electricidad) (kWh)	17476,38
Iluminación (kWh)	12385,66
Calefacción (Gas) (kWh)	195,08
Refrigeración (Electricidad) (kWh)	739,56
ACS (Electricidad) (kWh)	1581,32
Temperatura del Aire (°C)	21,00
Temperatura Radiante (°C)	20,75
Temperatura Operativa (°C)	20,88
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Acristalamiento (kWh)	2501,34
Muros (kWh)	-4826,56
Suelos S.T. (kWh)	-7992,20
Particiones (kWh)	-20,59
Cubiertas (kWh)	-11002,07
Aire Exterior (kWh)	-8369,44
Ventilación Ext. (kWh)	-5549,36
Iluminación General (kWh)	12385,66
Computadoras y Equipos (kWh)	17476,38
Ocupación (kWh)	7794,76
Gan. Solares Ventanas Ext. (kWh)	5619,99
Calef. Sens. de Zona (kWh)	3808,68
Refrig. Sens. de Zona (kWh)	-11056,70
Enfriamiento Sensible (kWh)	-11057,90
Enfriamiento Total (kWh)	-14791,26
Calentamiento Total (kWh)	3901,63
Vent. Mec. + Vent. Nat. + Infil. (ren/h)	1,32

Figura 57. Valores numéricos de ganancias de calor. Edificio industrial con panel convencional

Con PCM (BioPCM M182/Q21)

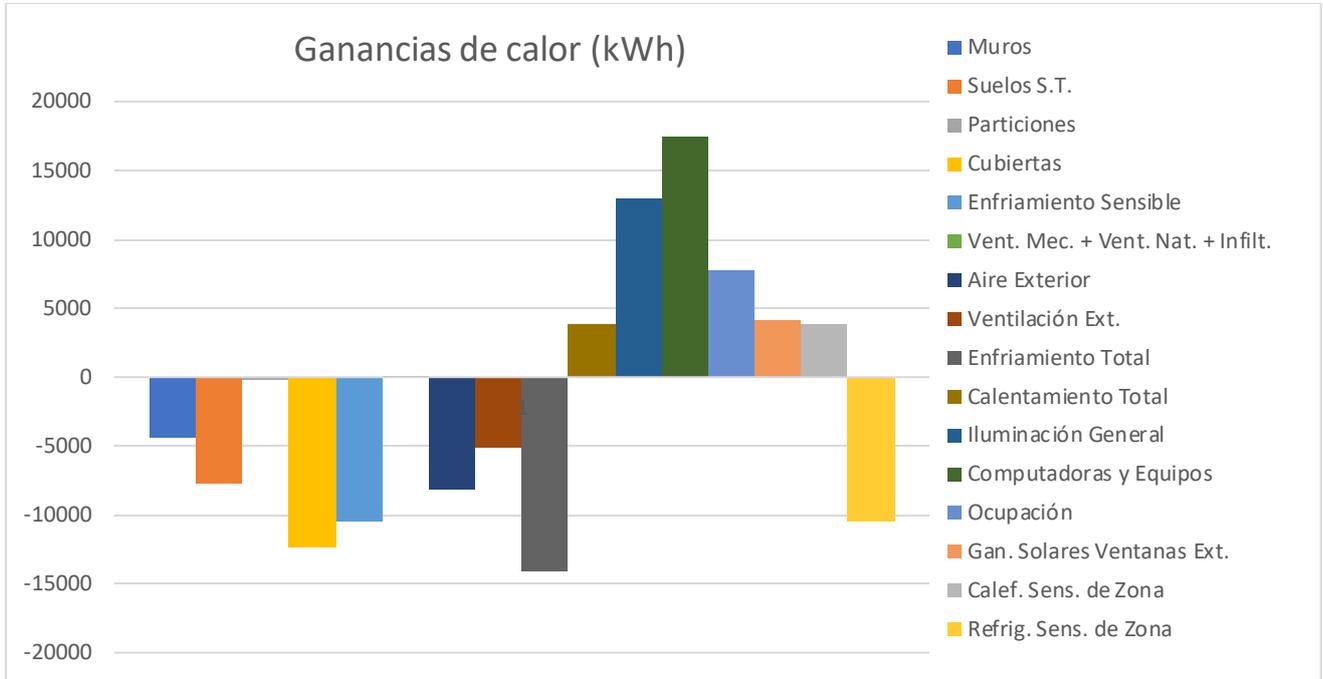


Figura 58. Gráfica de ganancias de calor. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21

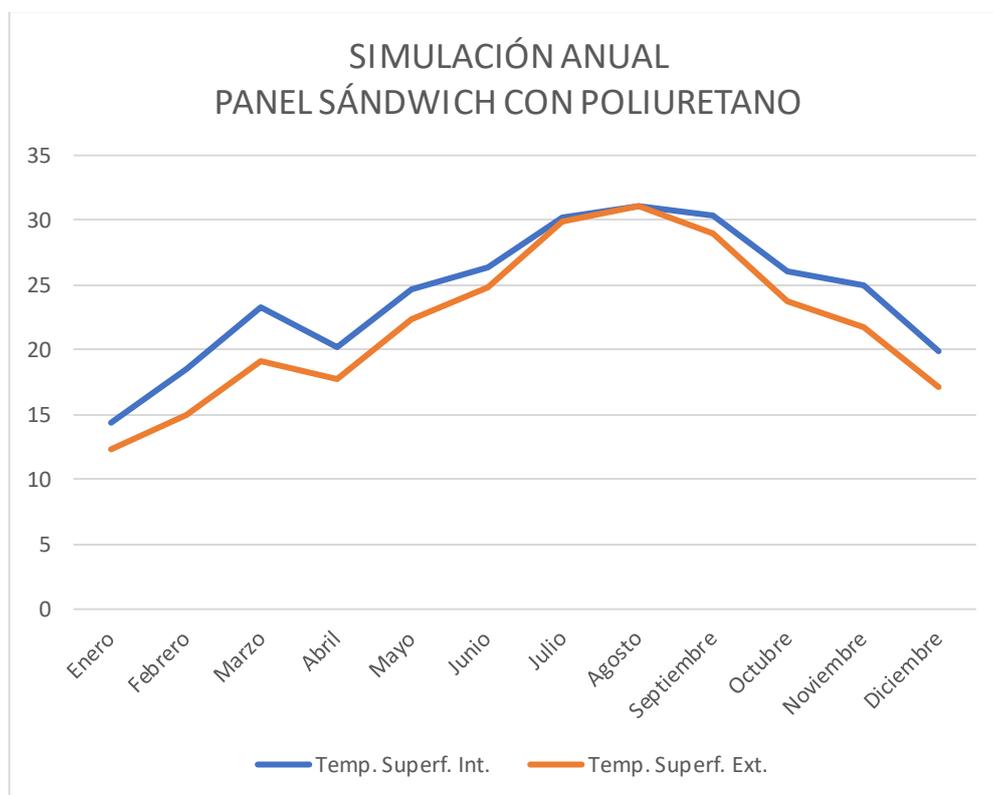
Aparatos (Electricidad) (kWh)	17476,38
Iluminación (kWh)	11806,09
Calefacción (Gas) (kWh)	195,80
Refrigeración (Electricidad) (kWh)	699,95
ACS (Electricidad) (kWh)	1581,32
Temperatura del Aire (°C)	20,95
Temperatura Radiante (°C)	20,62
Temperatura Operativa (°C)	20,78
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Acristalamiento (kWh)	3390,86
Muros (kWh)	-4662,82
Suelos S.T. (kWh)	-7854,84
Particiones (kWh)	-20,64
Cubiertas (kWh)	-12742,21
Aire Exterior (kWh)	-8257,32
Ventilación Ext. (kWh)	-5175,91
Iluminación General (kWh)	11806,09
Computadoras y Equipos (kWh)	17476,38
Ocupación (kWh)	7795,39
Gan. Solares Ventanas Ext. (kWh)	5624,47
Calef. Sens. de Zona (kWh)	3822,28
Refrig. Sens. de Zona (kWh)	-10416,52
Enfriamiento Sensible (kWh)	-10417,19
Enfriamiento Total (kWh)	-13998,96
Calentamiento Total (kWh)	3916,00
Vent. Mec. + Vent. Nat. + Infilt. (ren/h)	1,29

Figura 59. Valores numéricos de ganancias de calor. Edificio industrial con BioPCM  
M182/Q21

Si en lugar de hacer una simulación anual de hace mensual, se extraen temperaturas superficiales exteriores e interiores y se representan de manera conjunta, se observa claramente el efecto que crea un panel con PCM respecto a uno convencional con poliuretano.

El resultado que se expone pertenece al modelo de vivienda unifamiliar, aunque el patrón seguido por las temperaturas es semejante para el caso del edificio industrial, aunque con diferentes valores.

En la Figura 60, se observa que las temperaturas interior y exterior siguen un patrón parecido a lo largo del año, con una variación temperatura en el interior del modelo similar al ocurrido en el exterior de este. En el interior se experimentan temperaturas mínimas de aproximadamente 12°C en enero y máximas en agosto que alcanzan los 31 °C.



*Figura 60. Temperaturas superficie interior y exterior panel convencional*

<b>Mes</b>	<b>Temperatura Superficie Interior (°C)</b>	<b>Temperatura Superficie Exterior (°C)</b>
Enero	14,38	12,33
Febrero	18,58	14,98
Marzo	23,32	19,18
Abril	20,18	17,67
Mayo	24,62	22,33
Junio	26,44	24,76
Julio	30,25	29,85
Agosto	31,09	31,09
Septiembre	30,43	28,93
Octubre	25,99	23,79
Noviembre	24,93	21,80
Diciembre	19,97	17,09

*Tabla 6. Temperaturas superficie interior y exterior panel convencional*

En la Figura 61, se muestra lo ocurrido con un panel sándwich con PCM. Se observa que la temperatura interior experimenta un salto térmico con respecto a la interior de casi 4°C. Esto se debe al almacenamiento de energía que ocurre en el material debido al cambio de fase.

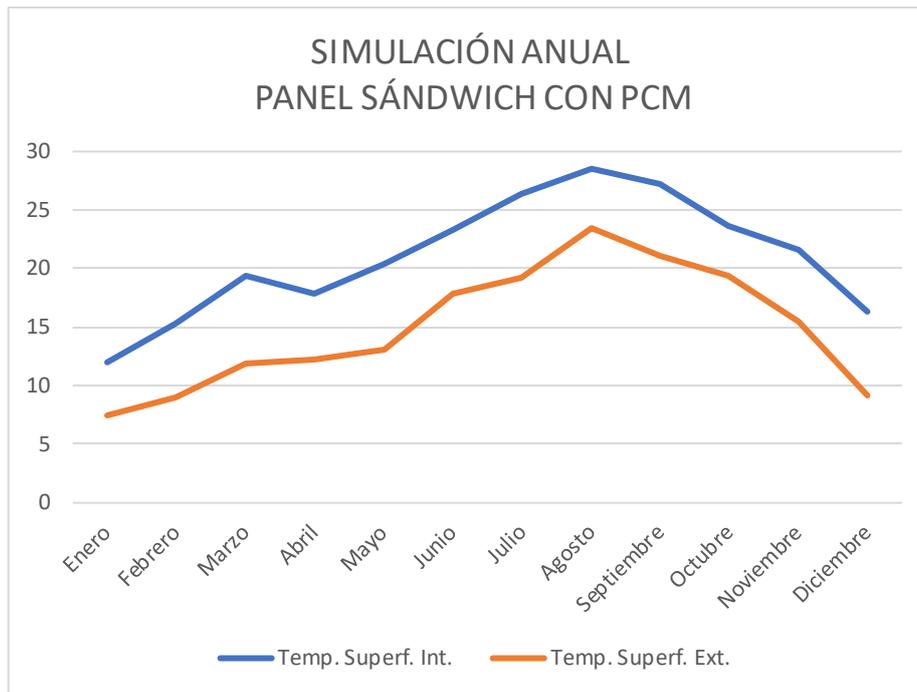


Figura 61. Temperaturas superficie interior y exterior panel con PCM

Mes	Temperatura Superficie Interior (°C)	Temperatura Superficie Exterior (°C)
Enero	12,00	7,47
Febrero	15,31	8,92
Marzo	19,31	11,95
Abril	17,77	12,27
Mayo	20,39	13,08
Junio	23,26	17,90
Julio	26,37	19,26
Agosto	28,53	23,46
Septiembre	27,23	21,02
Octubre	23,61	19,32
Noviembre	21,65	15,41
Diciembre	16,34	9,17

Tabla 7. Temperaturas superficie interior y exterior panel con PCM

### 5.1.1. Cargas de calefacción

Siguiendo con el estudio de eficiencia energética, se van a comparar las potencias de calefacción y refrigeración que tienen el edificio industrial y la vivienda unifamiliar, para cada uno de los materiales de construcción elegidos. El objetivo último será ver el ahorro energético y económico que supone la utilización de un material de cambio de fase respecto a uno convencional.

Como ya se comentó anteriormente, un detalle a tener en cuenta en este proceso es la influencia de la abertura de las ventanas, que en todas las simulaciones se ha fijado al 5%. Variar este parámetro supone una variación en las cargas de refrigeración y calefacción ya que varía la ventilación natural.

Las cargas de calefacción siguen un patrón que se repite en cada simulación, y que concuerda con los datos climáticos de la Región de Murcia. A modo de ejemplo se representan las necesidades de energía en forma de gas que presenta el Edificio industrial en el año 2021. Puesto que la temperatura de consigna para ambos modelos son los 20°C que el programa propone por defecto, las cargas de calentamiento son nulas a partir de mayo y hasta noviembre.

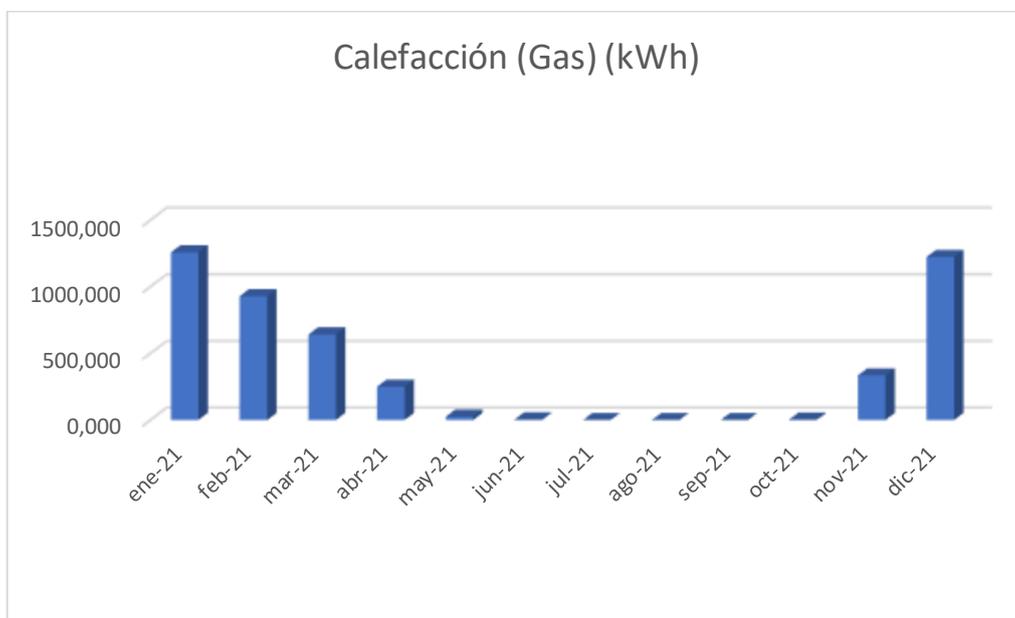


Figura 62. Consumo anual de gas. Edificio industrial 2021

Para obtener los datos de energía de calentamiento y enfriamiento, en la pestaña “simulación” seleccionamos obtener todos los valores, de manera mensual, en el año

2021. Para obtener otros valores como la potencia necesaria de cada instalación accedemos a los valores que ofrece el simulador en la pestaña “Diseño de calefacción”.

Los resultados de cada edificio son los siguientes:

➤ Vivienda unifamiliar

Con PCM (BioPCM M182/Q21)

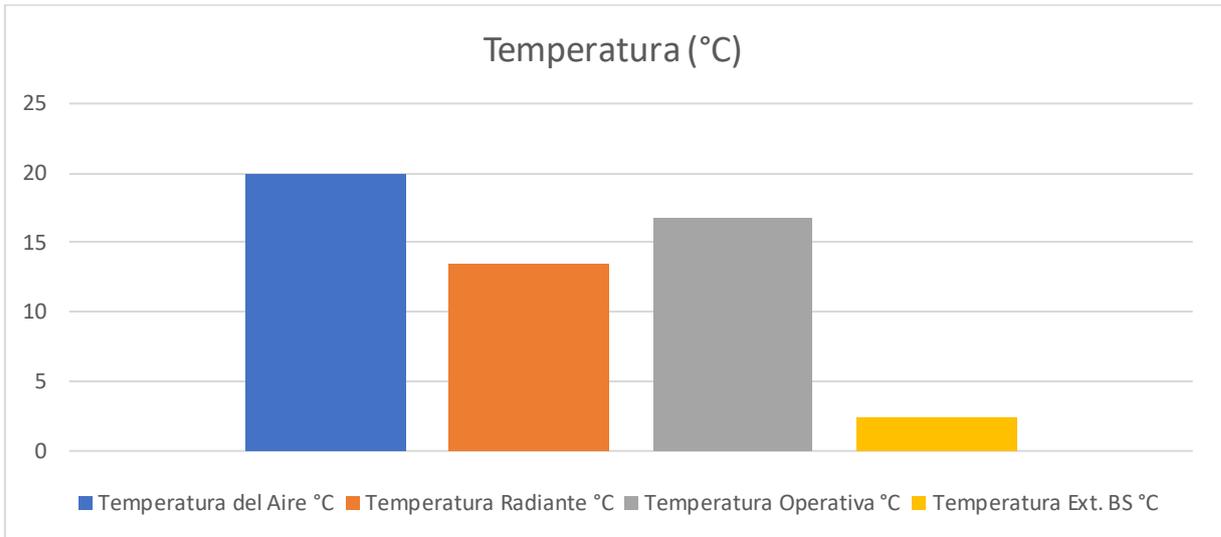


Figura 63. Temperaturas vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21

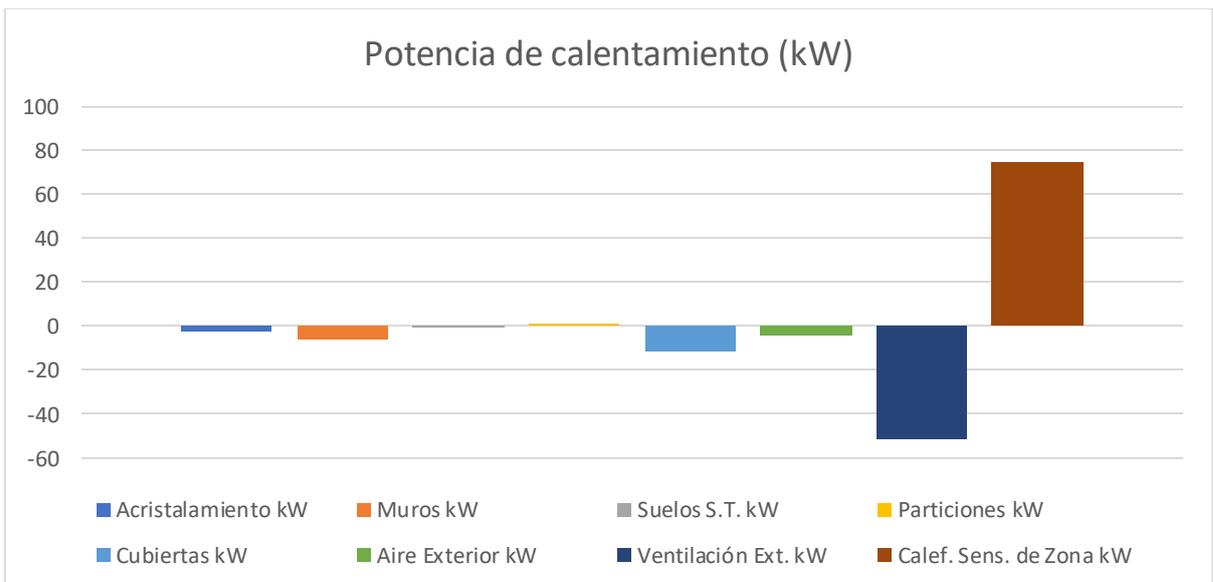


Figura 64. Potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21

Temperatura del Aire (°C)	20,00
Temperatura Radiante (°C)	15,38
Temperatura Operativa (°C)	17,69
Temperatura Ext. BS (°C)	2,40
Acristalamiento (kW)	-1,31
Muros (kW)	-3,63
Techos (kW)	-0,27
Suelos Int. (kW)	0,06
Suelos S.T. (kW)	0,03
Particiones (kW)	0,00
Aire Exterior (kW)	-1,30
Ventilación Ext. (kW)	-0,92
Calef. Sens. de Zona (kW)	7,33

Figura 65. Valores numéricos potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21

En modo resumen:

Bloque /	Zona	Temperatura de Confort (°C)	Pérdida de Calor (kW)	Capacidad Nominal (kW)
-  Edificio 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 8,790 (kW)				
-  Cubierta 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 0,000 (kW)				
Cubierta 1	Zona 1	2,16	0,00	<b>0,00</b>
-  Planta 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 4,350 (kW)				
Planta 1	Zona 1	17,70	2,21	<b>2,65</b>
Planta 1	Zona 2	17,92	0,88	<b>1,05</b>
Planta 1	Zona 3	17,83	0,55	<b>0,65</b>
-  Planta baja Capacidad Nominal Total de Calefacción = 4,440 (kW)				
Planta baja	Zona 2	17,45	1,49	<b>1,79</b>
Planta baja	Zona 1	17,71	2,21	<b>2,65</b>

Figura 66. Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar con BioPCM M182/Q21

Sin PCM

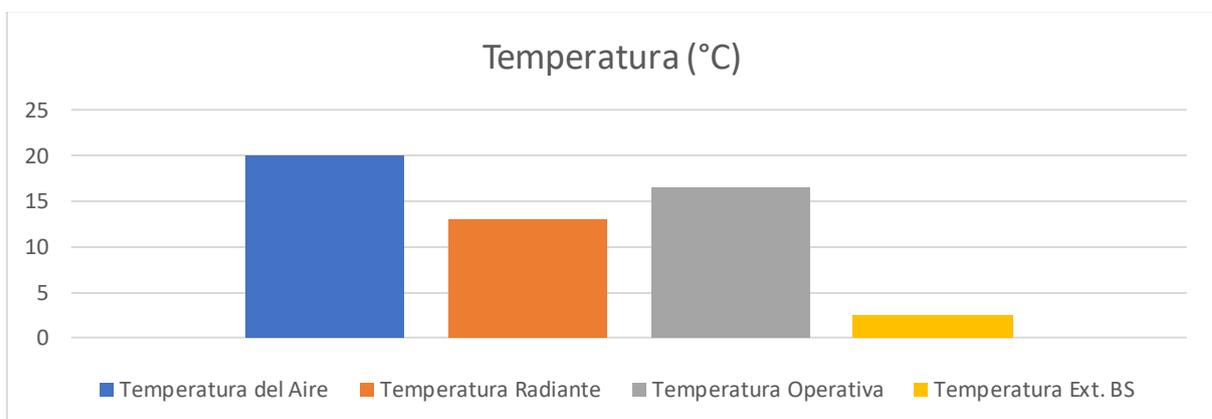


Figura 67. Temperaturas vivienda unifamiliar panel convencional

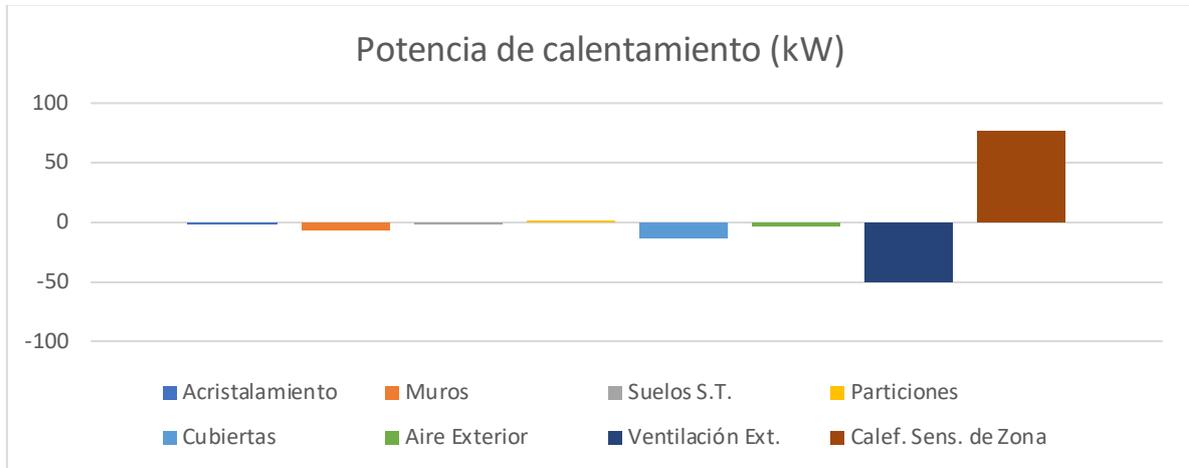


Figura 68. Potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar panel convencional

Temperatura del Aire (°C)	20,00
Temperatura Radiante (°C)	15,12
Temperatura Operativa (°C)	17,56
Temperatura Ext. BS (°C)	2,40
Acristalamiento (kW)	-1,30
Muros (kW)	-4,03
Techos (kW)	-0,28
Suelos Int. (kW)	0,07
Suelos S.T. (kW)	0,03
Particiones (kW)	0,00
Aire Exterior (kW)	-1,30
Ventilación Ext. (kW)	-0,92
Calef. Sens. de Zona (kW)	7,72

Figura 69. Valores numéricos potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar panel convencional

En modo resumen:

Bloque /	Zona	Temperatura de Confort (°C)	Pérdida de Calor (kW)	Capacidad Nominal (kW)
Edificio 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 9,260 (kW)				
- Cubierta 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 0,000 (kW)				
Cubierta 1	Zona 1	1,99	0,00	<b>0,00</b>
- Planta 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 4,600 (kW)				
Planta 1	Zona 1	17,56	2,33	<b>2,79</b>
Planta 1	Zona 2	17,80	0,93	<b>1,11</b>
Planta 1	Zona 3	17,70	0,58	<b>0,70</b>
- Planta baja Capacidad Nominal Total de Calefacción = 4,660 (kW)				
Planta baja	Zona 2	17,34	1,56	<b>1,87</b>
Planta baja	Zona 1	17,57	2,33	<b>2,79</b>

*Figura 70. Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Vivienda unifamiliar panel convencional*

Los resultados en régimen estacionario para el caso de la vivienda unifamiliar se muestran en las Figura 63 y Figura 67. Aquí se aprecian datos significativos como son las pérdidas en los cerramientos, las debidas a la ventilación natural, así como las temperaturas de consigna, la radiante y la operativa. Las temperaturas operativas en ambos casos muestran que la situación de la vivienda no sería muy confortable, pues operativa y de consigna distan más de 2°C.

Por otro lado, como era de esperar se aprecia una disminución en el valor de calefacción sensible de zona de 390 W en la vivienda con paneles con PCM respecto a la de paneles convencionales, que equivale a 470 W de diferencia en la capacidad nominal del sistema.

Otra forma de representar los resultados que ofrece DesignBuilder es en modo resumen. Aquí el programa proporciona la potencia de calefacción necesaria en cada una de las zonas y la total de la vivienda, con un sobredimensionado del sistema de un 20%. A modo ilustrativo comprobamos que, en el primer caso, "Calefacción Sensible de Zona" tiene un valor de 7,33 kW, mientras que el valor de "Capacidad nominal total de calefacción" es de 9,26 kW, siendo la relación entre ambos valores de 1,2.

Teniendo en cuenta estos datos, se ha calculado el ahorro energético anual en calefacción. Para ello, se ha supuesto la utilización del gas natural como combustible, en concreto la tarifa 3.1 TUR, que es la adecuada para un consumo anual menor de 5.000 kWh. Sus precios son revisados por el Gobierno cada tres meses y aparecen en el BOE. Los precios vigentes de enero a julio de 2021 son los siguientes:

- Término fijo: 4,26 €/mes
- Término variable: 0,0479 €/kWh

Para el estudio de los gastos en calefacción de cada mes se han exportado los consumos medios de energía, en kWh, correspondientes al año 2021. Entre estos datos se distinguen valores denominados "Calentamiento total kWh", que no contempla el rendimiento del equipo de transferencia de calor, del 85%. Es por esto por lo que los valores utilizados para este estudio son los que se encuentran bajo la denominación "Calefacción (Gas) kWh". Además, es de tener en cuenta que el poder calorífico al que

se hacen referencia estos valores es el inferior -PCI-, mientras que el término variable viene referenciado al superior -PCS- siendo la relación PCI/PCS comúnmente aceptada de 0,9.

El cálculo realizado mes a mes se encuentra en la Tabla 8 a modo de ejemplo, aunque estos cálculos se han repetido en las sucesivas simulaciones. Cabe mencionar que los valores de la columna “Término variable (€/mes)” se han calculado como sigue:

$$\text{Término variable} \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = 0,0479 \frac{\text{€}}{\text{kWh}_{PCS}} \cdot \frac{\text{kWh}_{PCI}}{\text{mes}} \cdot \frac{1}{0,9} \frac{\text{kWh}_{PCS}}{\text{kWh}_{PCI}}$$

Calefacción; Vivienda familiar con poliuretano				
Mes	Calefacción (Gas) (kWh)	Término fijo (€/mes)	Término variable (€/mes)	TOTAL
ene-21	263,541	4,26	14,03	18,29
feb-21	186,212	4,26	9,91	14,17
mar-21	110,217	4,26	5,87	10,13
abr-21	14,370	4,26	0,76	5,02
may-21	0,000	4,26	0,00	4,26
jun-21	0,000	4,26	0,00	4,26
jul-21	0,000	4,26	0,00	4,26
ago-21	0,000	4,26	0,00	4,26
sep-21	0,000	4,26	0,00	4,26
oct-21	0,000	4,26	0,00	4,26
nov-21	29,619	4,26	1,58	5,84
dic-21	256,966	4,26	13,68	17,94
<b>GASTO ANUAL</b>	860,925	51,12	45,82	<b>96,94 €</b>

Tabla 8. Consumo de calefacción anual. Vivienda unifamiliar. Panel convencional

De la misma manera, se han realizado los cálculos para el modelo con PCM que se muestran en la Tabla 9. Los resultados muestran que el ahorro en calefacción al utilizar PCM es de 5,79 €/año.

Calefacción; Vivienda familiar con PCM				
2021	Calefacción (Gas) (kWh)	Término fijo (€)	Término variable (€)	TOTAL
<b>GASTO ANUAL</b>	752,097	51,12	40,03	<b>91,15 €</b>

Tabla 9. Consumo de calefacción anual. Vivienda unifamiliar. Panel con PCM

➤ Nave industrial

El mismo estudio, para el caso del edificio industrial, arroja como resultados una disminución en el valor de calefacción sensible de zona de 1540 W en el edificio con paneles con PCM respecto al de paneles convencionales, que equivale a 1848 W de diferencia en la capacidad nominal del sistema.

Además, se observa que en este caso las temperaturas operativas con ambos materiales muestran que la situación no sería muy confortable, pues operativa y de consigna distan aproximadamente 3°C.

Con PCM (BioPCM M182/Q21)

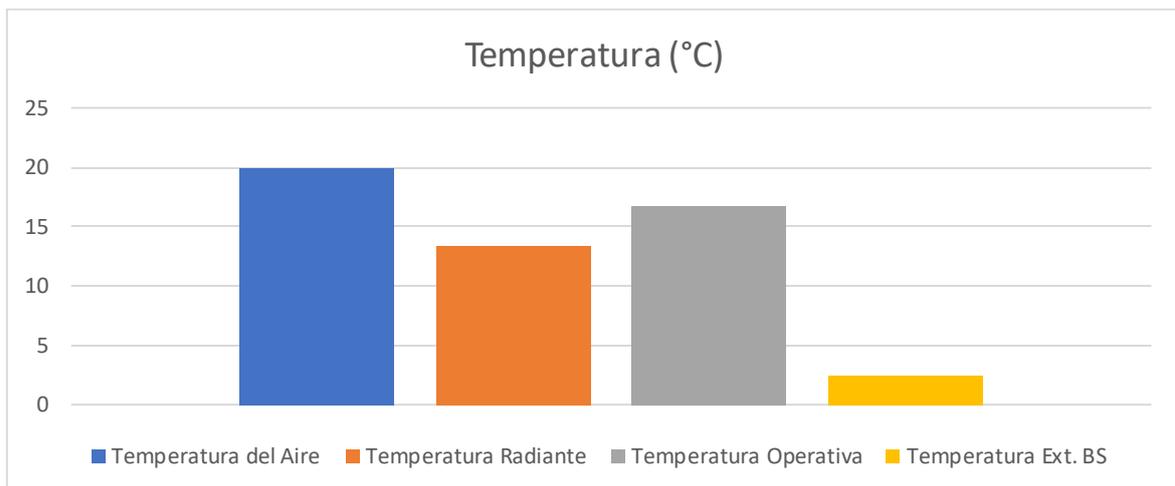


Figura 71. Temperaturas edificio industrial con BioPCM M182/Q21

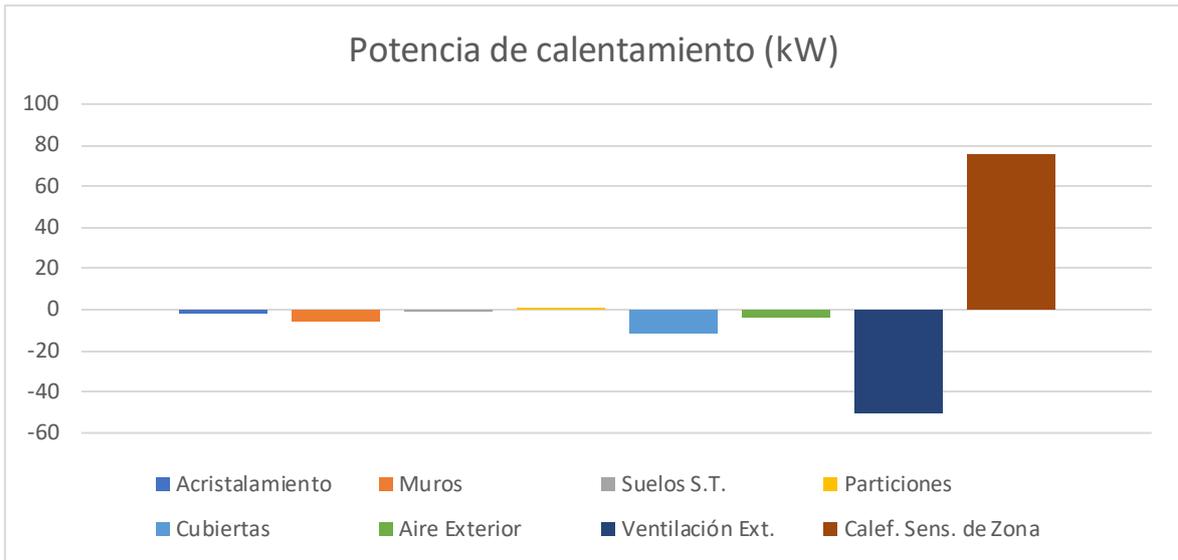


Figura 72. Potencia de calefacción. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21

Temperatura del Aire (°C)	20,00
Temperatura Radiante (°C)	14,04
Temperatura Operativa (°C)	17,02
Temperatura Ext. BS (°C)	2,40
Acristalamiento (kW)	-2,86
Muros (kW)	-2,72
Suelos S.T. (kW)	-0,11
Particiones (kW)	0,00
Cubiertas (kW)	-11,95
Aire Exterior (kW)	-4,38
Ventilación Ext. (kW)	-52,50
Calif. Sens. de Zona (kW)	74,52

Figura 73. Valores numéricos potencia de calefacción. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21

En modo resumen:

Bloque /	Zona	Temperatura de Conf...	Pérdida de Calor (kW)	Capacidad Nominal [...]
-  PCM Capacidad Nominal Total de Calefacción = 89,420 (kW)				
-  Block 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 89,420 (kW)				
Block 1	Zone 1	16,88	37,48	<b>44,98</b>
Block 1	Zone 2	16,91	20,83	<b>25,00</b>
Block 1	Zone 3	17,47	16,20	<b>19,44</b>

Figura 74. Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Edificio industrial con BioPCM M182/Q21

SIN PCM

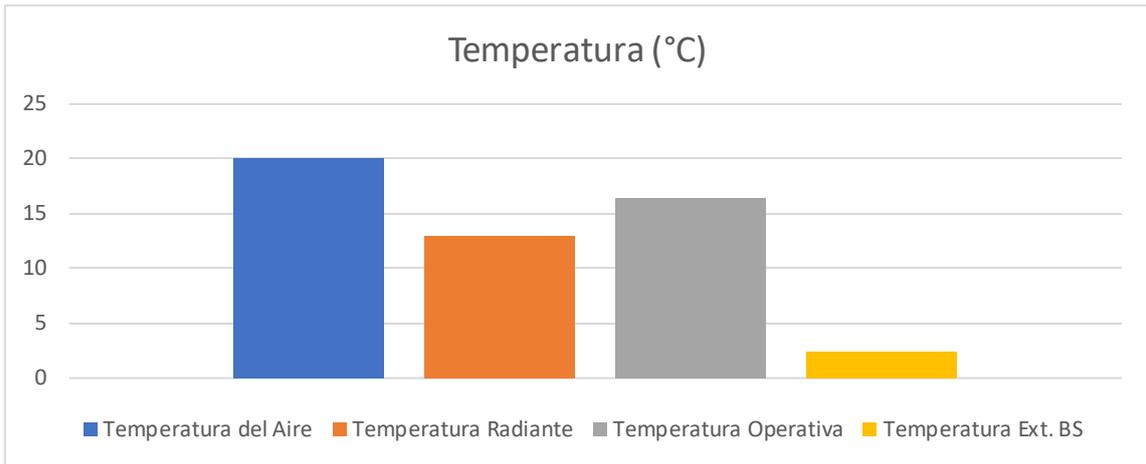


Figura 75. Temperaturas edificio industrial panel convencional

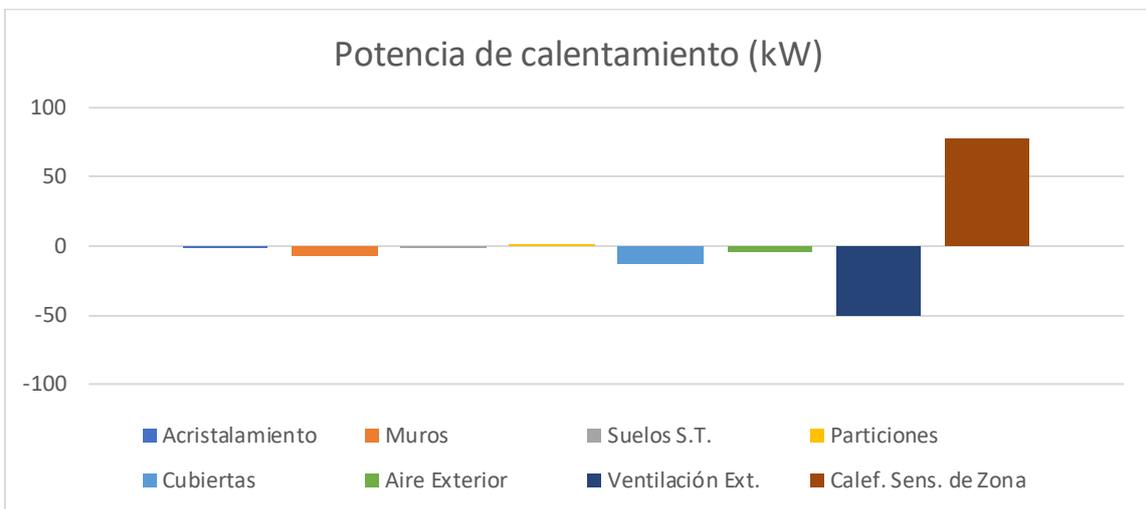


Figura 76. Potencia de calefacción. Edificio industrial panel convencional

Temperatura del Aire (°C)	20,00
Temperatura Radiante (°C)	13,66
Temperatura Operativa (°C)	16,83
Temperatura Ext. BS (°C)	2,40
Acristalamiento (kW)	-2,82
Muros (kW)	-3,00
Suelos S.T. (kW)	-0,07
Particiones (kW)	0,00
Cubiertas (kW)	-13,30
Aire Exterior (kW)	-4,38
Ventilación Ext. (kW)	-52,50
Calif. Sens. de Zona (kW)	76,06

Figura 77. Valores numéricos potencia de calefacción. Edificio industrial panel convencional

En modo resumen:

Bloque /	Zona	Temperatura de Conf...	Pérdida de Calor (kW)	Capacidad Nominal (...)
- Sin PCM Capacidad Nominal Total de Calefacción = 91,280 (kW)				
- Block 1 Capacidad Nominal Total de Calefacción = 91,280 (kW)				
Block 1	Zone 1	16,68	38,25	<b>45,91</b>
Block 1	Zone 2	16,72	21,27	<b>25,52</b>
Block 1	Zone 3	17,29	16,54	<b>19,85</b>

Figura 78. Resultados en modo resumen de potencia de calefacción. Edificio industrial panel convencional

Para calcular el ahorro energético se han utilizado en este caso los valores de la tarifa 3.2 TUR, que es la adecuada para consumos anuales de más de 5.000 kWh. Esta tarifa de último recurso está regulada por el Gobierno, y es, en la mayoría de los casos, la referencia que toman el resto de las tarifas de gas natural de todas las compañías gasistas.

Los precios vigentes de enero a julio de 2021 son los siguientes:

- Término fijo: 8,02 €/mes
- Término variable: 0,0403 €/kWh

El cálculo realizado mes a mes se encuentra en la Tabla 10 a modo de ejemplo, aunque estos cálculos se han repetido en las sucesivas simulaciones. Cabe mencionar que los valores de la columna "Término variable (€/mes)" se han calculado como sigue:

$$\text{Término variable} \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = 0,0403 \frac{\text{€}}{\text{kWh}_{PCS}} \cdot \frac{\text{kWh}_{PCI}}{\text{mes}} \cdot \frac{1}{0,9} \frac{\text{kWh}_{PCS}}{\text{kWh}_{PCI}}$$

Calefacción; Edificio industrial con poliuretano				
Mes	Calefacción (Gas) (kWh)	Término fijo (€/mes)	Término variable (€/mes)	TOTAL
ene-21	1230,467	8,02	55,10	63,12

feb-21	910,829	8,02	40,78	48,80
mar-21	624,575	8,02	27,97	35,99
abr-21	238,848	8,02	10,70	18,72
may-21	21,707	8,02	0,97	8,99
jun-21	3,167	8,02	0,14	8,16
jul-21	0,000	8,02	0,00	8,02
ago-21	0,000	8,02	0,00	8,02
sep-21	0,000	8,02	0,00	8,02
oct-21	2,366	8,02	0,11	8,13
nov-21	320,622	8,02	14,36	22,38
dic-21	1196,932	8,02	53,60	61,62
<b>GASTO ANUAL</b>	4549,512	96,24	203,72	<b>299,96 €</b>

*Tabla 10. Consumo de calefacción anual. Edificio industrial. Panel convencional*

De la misma manera, se han realizado los cálculos para el modelo con PCM que se muestran en la Tabla 11. Los resultados muestran que no existe ahorro en calefacción al utilizar PCM en este modelo, si no un gasto superior de 1,05€/año.

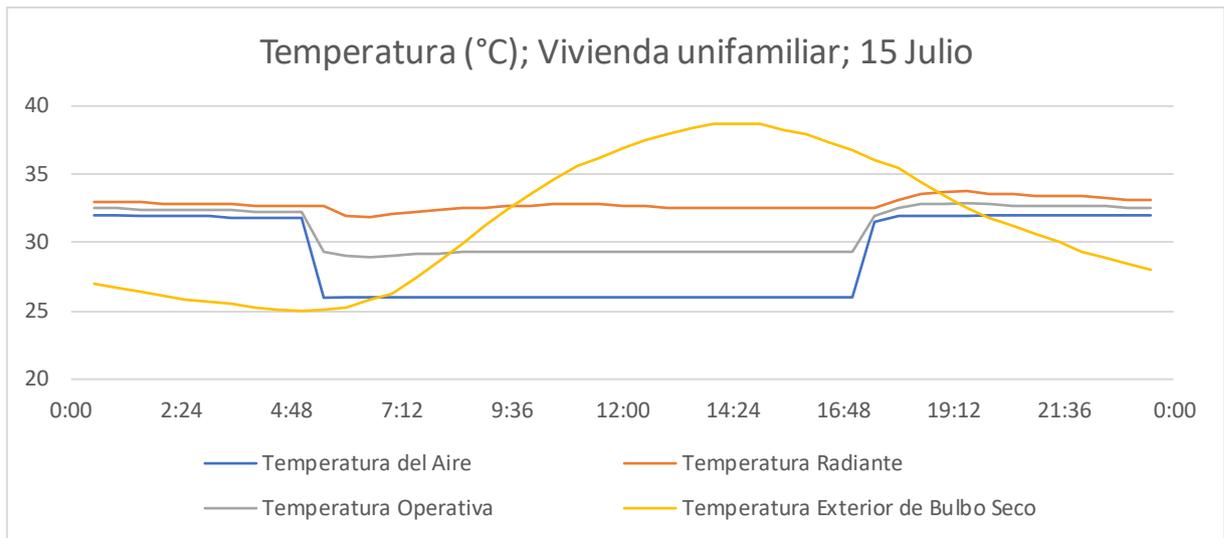
Calefacción; Edificio industrial con PCM				
2021	Calefacción (Gas) (kWh)	Término fijo (€)	Término variable (€)	TOTAL
<b>GASTO ANUAL</b>	4572,994	96,24	204,77	<b>301,01 €</b>

*Tabla 11. Consumo de calefacción anual. Edificio industrial. Panel con PCM*

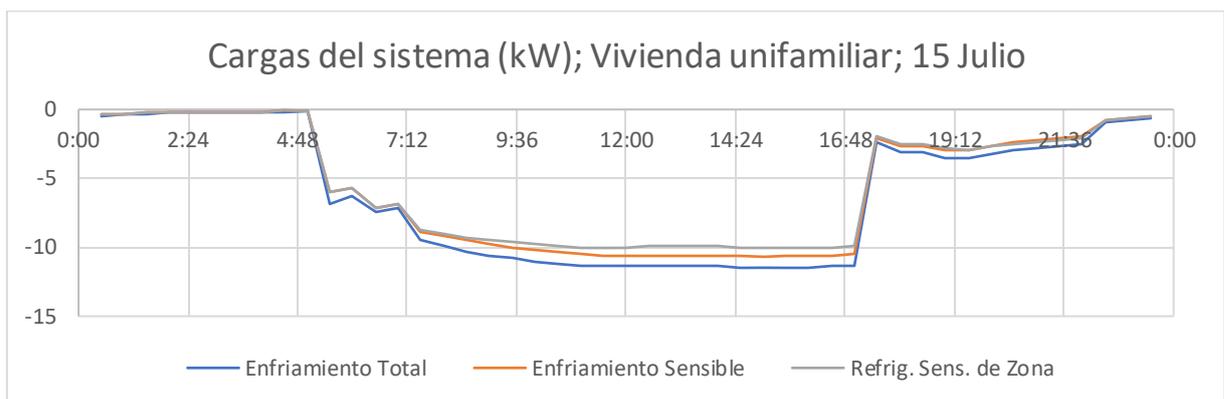
### 5.1.2. Cargas de refrigeración

Para el diseño del sistema de refrigeración ya no se obtiene un cálculo en régimen estacionario como ocurría en el diseño de calefacción, si no que el programa ofrece un régimen dinámico, como se muestra en la Figura 79. En esta se observan algunos valores a destacar:

- La temperatura exterior y la temperatura interior de manera conjunta.
- Picos de enfriamiento cuando se enciende la refrigeración.



*Figura 79. Temperaturas régimen dinámico vivienda unifamiliar*



*Figura 80. Cargas del sistema*

Para calcular el consumo energético por meses se recurre a los datos de simulación anuales. Al igual que ocurría con las cargas de calefacción, las cargas de refrigeración siguen un patrón que se repite en cada simulación, y que concuerda con los datos climáticos de la Región de Murcia. A modo de ejemplo se representan las necesidades de energía en forma de electricidad que presenta el edificio industrial en el año 2021. A partir de noviembre y hasta abril las cargas de enfriamiento son nulas.

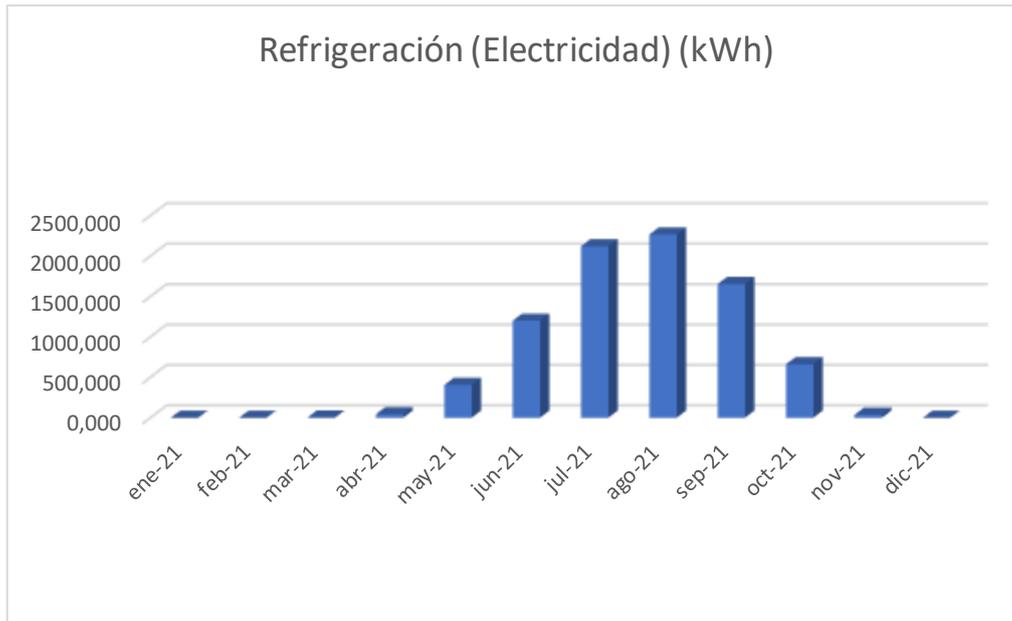


Figura 81. Consumo anual refrigeración

Por otro lado, a efectos de cálculo de costes es más cómodo trabajar directamente con los valores que ofrece la pestaña “resumen”, donde se muestra la capacidad nominal del sistema de refrigeración. En este diseño, la temperatura consigna se ha fijado en 24°C.

Puesto que este sistema se encuentra también sobredimensionado un 20%, en las Figura 82 y Figura 83 observamos que los valores de “Carga nominal (kW)” son 1,2 veces los valores de “Carga total de refrigeración (kW)”. Esta última aparece además desglosada en las columnas siguientes como carga latente, o carga sensible.

➤ Vivienda unifamiliar

Con PCM (BioPCM M182/Q21)

Zona	Bloque ▾	Capacidad Nominal (kW)	Caudal Nominal (m³/s)	Carga Total de Refrigera...	Carga Sensible (k...	Carga Latente (kW)
- Edificio 1						
Zona 2	Planta baja	<b>2,64</b>	<b>0,147</b>	2,20	2,06	0,13
Zona 1	Planta baja	<b>4,55</b>	<b>0,252</b>	3,79	3,53	0,26
Zona 3	Planta 1	<b>1,02</b>	<b>0,058</b>	0,85	0,81	0,04
Zona 2	Planta 1	<b>1,99</b>	<b>0,112</b>	1,66	1,57	0,09
Zona 1	Planta 1	<b>4,48</b>	<b>0,248</b>	3,74	3,48	0,25
Zona 1	Cubierta 1	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
<b>Totales</b>	-	<b>14,68</b>	<b>0,816</b>	<b>12,23</b>	<b>11,45</b>	<b>0,78</b>

Figura 82. Resumen carga de refrigeración con PCM

### SIN PCM

Zona	Bloque ▾	Capacidad Nominal (kW)	Caudal Nominal (m³/s)	Carga Total de Refrigeración	Carga Sensible (kW)	Carga Latente (kW)
- Edificio 1						
Zona 1	Planta baja	<b>4,64</b>	<b>0,257</b>	3,87	3,61	0,26
Zona 2	Planta baja	<b>2,65</b>	<b>0,148</b>	2,21	2,08	0,13
Zona 3	Planta 1	<b>1,04</b>	<b>0,059</b>	0,87	0,82	0,04
Zona 2	Planta 1	<b>2,01</b>	<b>0,113</b>	1,67	1,58	0,09
Zona 1	Planta 1	<b>4,52</b>	<b>0,251</b>	3,77	3,52	0,25
Zona 1	Cubierta 1	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
<b>Totales</b>	-	<b>14,87</b>	<b>0,828</b>	<b>12,39</b>	<b>11,61</b>	<b>0,78</b>

*Figura 83. Resumen carga de refrigeración panel convencional*

Para estimar el ahorro energético se va a utilizar en este caso una tarifa de electricidad ofrecida por Iberdrola sin discriminación horaria, con los siguientes precios:

- Término de potencia: 0,134486 €/kW día
- Impuesto sobre electricidad: 5,11269632% s/27,23 €
- Término de energía: 0,142319 €/kWh
- Alquiler equipos de medida: 0,02663€/día
- IVA: 21%

En cada una de las columnas de las tablas de resultados se han realizado los siguientes cálculos:

$$\text{Término de potencia } TP \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = 0,134486 \frac{\text{€}}{\text{kW día}} \cdot \text{kW} \cdot \frac{\text{días}}{\text{mes}}$$

$$\text{Término de energía } TE \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = 0,142319 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

$$\text{Impuesto de electricidad } IE \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = 0,0511269632 \cdot (TE + TP) \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

$$\text{Alquiler de equipos de medida } AE \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = 0,02663 \frac{\text{€}}{\text{día}} \cdot \frac{\text{días}}{\text{mes}}$$

$$\text{IVA} \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = 0,21 \cdot (TP + TE + IE + AE)$$

$$\text{Coste mensual} \left( \frac{\text{€}}{\text{mes}} \right) = TP + TE + IE + AE + IVA$$

Para el estudio de los gastos en refrigeración de cada mes se han utilizado los datos del archivo de consumos medios de energía en 2021, en kWh, denominados “Refrigeración (Electricidad) kWh”.

El hecho de no trabajar con los datos denominados “Enfriamiento total kWh” se debe a que, como ocurría en el diseño de la calefacción, ésta no contempla el rendimiento del equipo de transferencia de calor, de COP igual a 1,8.

El cálculo realizado mes a mes se encuentra en la Tabla 12 a modo de ejemplo, aunque estos cálculos se han repetido en las sucesivas simulaciones

Refrigeración; Vivienda familiar con poliuretano							
Mes	Refrigeración (Electricidad) (kWh)	Término de potencia (€/mes)	Término de energía (€/mes)	IE (€/mes)	Alquiler equipos medida (€/día)	IVA (€/mes)	TOTAL
ene-21	0,022	62,54	0,00	3,20	0,83	13,98	80,54
feb-21	1,720	56,48	0,24	2,90	0,75	12,68	73,05
mar-21	8,455	62,54	1,20	3,26	0,83	14,24	82,07
abr-21	12,937	60,52	1,84	3,19	0,80	13,93	80,28
may-21	96,385	62,54	13,72	3,90	0,83	17,01	97,98
jun-21	401,811	60,52	57,19	6,02	0,80	26,15	150,67
jul-21	790,954	62,54	112,57	8,95	0,83	38,83	223,71
ago-21	896,808	62,54	127,63	9,72	0,83	42,15	242,87
sep-21	665,633	60,52	94,73	7,94	0,80	34,44	198,42
oct-21	256,693	62,54	36,53	5,07	0,83	22,04	127,00
nov-21	39,061	60,52	5,56	3,38	0,80	14,75	85,01
dic-21	0,246	62,54	0,04	3,20	0,83	13,99	80,58
<b>GASTO ANUAL</b>	3170,724	736,31	451,25	60,72	9,72	264,18	<b>1522,18 €</b>

Tabla 12. Consumo de refrigeración anual. Vivienda unifamiliar. Panel convencional

De la misma manera, se han realizado los cálculos para el modelo con PCM que se muestran en la Tabla 13. Los resultados muestran que no existe ahorro en refrigeración al utilizar PCM en este modelo, si no un gasto superior de 22,08 €/año.

Refrigeración; Vivienda familiar con PCM							
2021	Refrigeración (Electricidad) (kWh)	Término de potencia (€)	Término de energía (€)	IE (€)	Alquiler equipos medida (€)	IVA (€)	TOTAL
<b>GASTO ANUAL</b>	3292,688	736,31	468,61	61,60	9,72	268,01	<b>1544,26 €</b>

Tabla 13. Consumo de refrigeración anual. Vivienda unifamiliar. Panel con PCM

➤ Nave industrial

SIN PCM

Zona	Bloque	Capacidad Nominal (kW)	Caudal Nominal (m³/s)	Carga Total de Refrigera...	Carga Sensible (k...	Carga Latente (kW)
- Sin PCM						
Zone 1	Block 1	20,38	1,303	17,72	16,35	1,37
Zone 3	Block 1	9,50	0,617	8,26	7,74	0,52
Zone 2	Block 1	11,61	0,752	10,10	9,43	0,67
<b>Totales</b>	-	<b>41,49</b>	<b>2,672</b>	<b>36,08</b>	<b>33,52</b>	<b>2,55</b>

Con PCM (BioPCM M182/Q21)

Zona	Bloque	Capacidad Nominal (kW)	Caudal Nominal (m³/s)	Carga Total de Refrigera...	Carga Sensible (k...	Carga Latente (kW)
- PCM						
Zone 1	Block 1	18,59	1,182	16,16	14,83	1,34
Zone 3	Block 1	7,78	0,493	6,76	6,19	0,57
Zone 2	Block 1	10,32	0,657	8,98	8,24	0,73
<b>Totales</b>	-	<b>36,69</b>	<b>2,332</b>	<b>31,90</b>	<b>29,26</b>	<b>2,64</b>

Refrigeración; Edificio industrial con poliuretano							
2021	Refrigeración (Electricidad) (kWh)	Término de potencia (€/mes)	Término de energía (€/mes)	IE (€/mes)	Alquiler equipos medida (€/día)	IVA (€/mes)	TOTAL
<b>GASTO ANUAL</b>	8400,77	2037,13	1195,59	165,28	9,72	715,62	<b>4123,34 €</b>
Refrigeración; Edificio industrial con PCM							
<b>GASTO ANUAL</b>	7777,22	2037,13	1106,84	160,74	9,72	696,03	<b>4010,46 €</b>

Tabla 14. Consumo de refrigeración anual. Edificio industrial. Panel convencional

Los resultados se muestran en la Tabla 14 donde se aprecia que el ahorro al utilizar PCM es de 112,88 €/año.

## 5.2. Estudio comparativo entre PCMs con diferente espesor

Puesto que el primer estudio daba como resultados muy poca disminución energética en cuanto a la vivienda unifamiliar se refiere, el presente se va a realizar exclusivamente con el modelo geométrico del edificio industrial.

En este modelo se van a utilizar los BioPCM de las series M27, M51, M91 y M182 del tipo Q21. Como se comentó en el capítulo anterior, la diferencia entre las series es el espesor, manteniéndose en este caso la curva Entalpía-Temperatura. De esta manera, lo que se hace es aumentar la cantidad de material aislante, por lo que de manera proporcional se espera una reducción del consumo energético.

El estudio del consumo en calefacción para cada uno de los PCMs se muestra en la Tabla 15. El ahorro en kWh es negativo para espesores pequeños, y se hace positivo con el espesor del tipo M182, resultando así un ahorro del 1,36% en calefacción, o lo que es lo mismo, de 63,34 kWh/año. Este hecho se justifica teniendo en cuenta que cuanto más energía retenga el material, más cálida se mantiene la estancia y por tanto la necesidad de calefacción es menor.

Edificio Industrial Año 2021	Calefacción (Gas) (kWh)	Calefacción (Gas) (€)	Ahorro (kWh)	Ahorro (€)	Ahorro (%)
<b>Poliuretano</b>	4670,3976	274,8320	-	-	-
<b>BioPCM M27 Q21</b>	10229,2326	541,1002	-5558,8350	-266,2682	-119,0227
<b>BioPCM M51 Q21</b>	8686,3228	416,0749	-4015,9252	-141,2428	-85,9868
<b>BioPCM M91 Q21</b>	6950,9038	416,0749	-2280,5062	-141,2428	-48,8290
<b>BioPCM M182 Q21</b>	4607,0580	271,7981	63,3396	3,0340	1,3562

*Tabla 15. Estudio de consumo en calefacción para cada serie de PCM. Edificio industrial.*

En cuanto a la refrigeración - Tabla 16 -, el ahorro disminuye a medida que se aumenta el espesor del aislante.

Edificio Industrial Año 2021	Refrigeración (Electricidad) (kWh)	Refrigeración (Electricidad) (€)	Ahorro (kWh)	Ahorro (€)	Ahorro (%)
<b>Poliuretano</b>	8400,7710	4123,3350	-	-	-
<b>BioPCM M27 Q21</b>	7272,0907	3919,0322	1128,6803	204,3028	13,4354
<b>BioPCM M51 Q21</b>	7427,3607	3947,1377	973,4103	176,1973	11,5872
<b>BioPCM M91 Q21</b>	7655,9176	3988,5089	744,8534	134,8262	8,8665
<b>BioPCM M182 Q21</b>	7777,2001	4010,4623	623,5709	112,8728	7,4228

*Tabla 16. Consumo de refrigeración anual para cada serie de PCM. Edificio industrial.*

Combinando ambas cargas y gastos, como se muestra en la Tabla 17, obtenemos que los gastos totales de energía disminuyen a medida que aumenta el espesor. Sin embargo, el único material que en cómputo global hace que se ahorre energía y dinero en el sistema es el BioPCM M182 Q21, con un ahorro de 686,91 kWh en el año 2021, equivalente al 5% y a 115€/año.

Edificio Industrial Año 2021	Consumo (kWh)	Consumo (€)	Ahorro (kWh)	Ahorro (€)	Ahorro (%)
<b>Poliuretano</b>	13071,1686	4398,1671	-	-	-
<b>BioPCM M27 Q21</b>	17501,3233	4460,1325	-4430,1547	-61,9654	-33,8926
<b>BioPCM M51 Q21</b>	16113,6835	4363,2126	-3042,5149	34,9545	-23,2765
<b>BioPCM M91 Q21</b>	14606,8214	4404,5837	-1535,6529	-6,4166	-11,7484
<b>BioPCM M182 Q21</b>	12384,2581	4282,2603	686,9105	115,9068	5,2552

*Tabla 17. Consumo anual para cada serie de PCM. Edificio industrial*

Para ver esto de manera más visual, en la Figura 84 y Figura 85 se han representado los consumos en kWh de refrigeración, calefacción y totales, y el ahorro económico que cada uno supone en €.

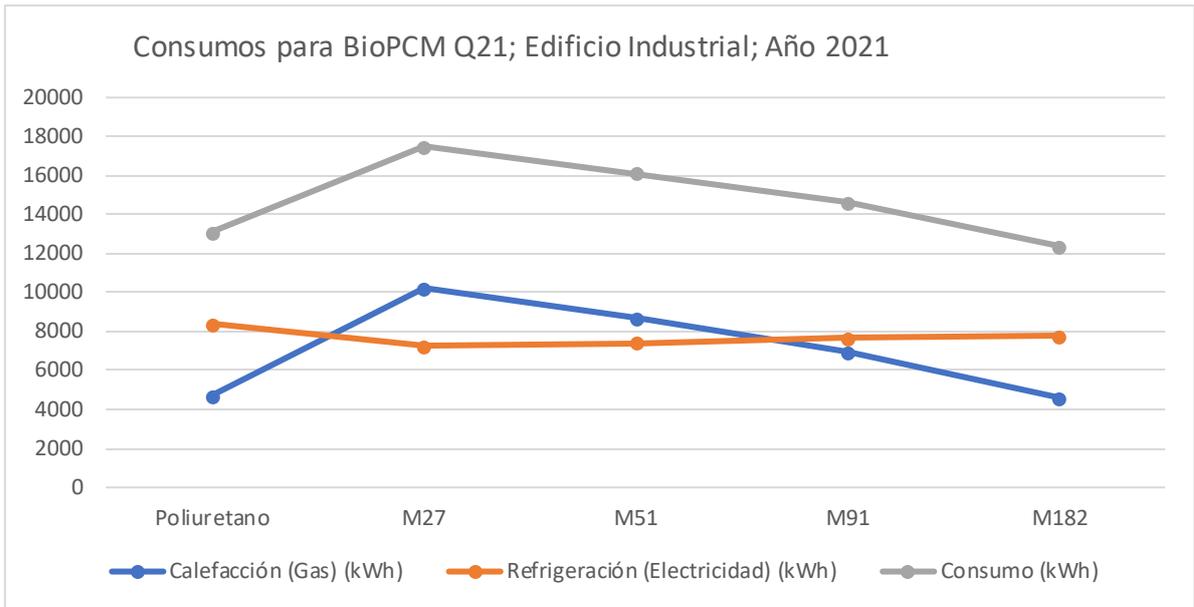


Figura 84. Consumos para BioPCM Q21. Edificio industrial Año 2021

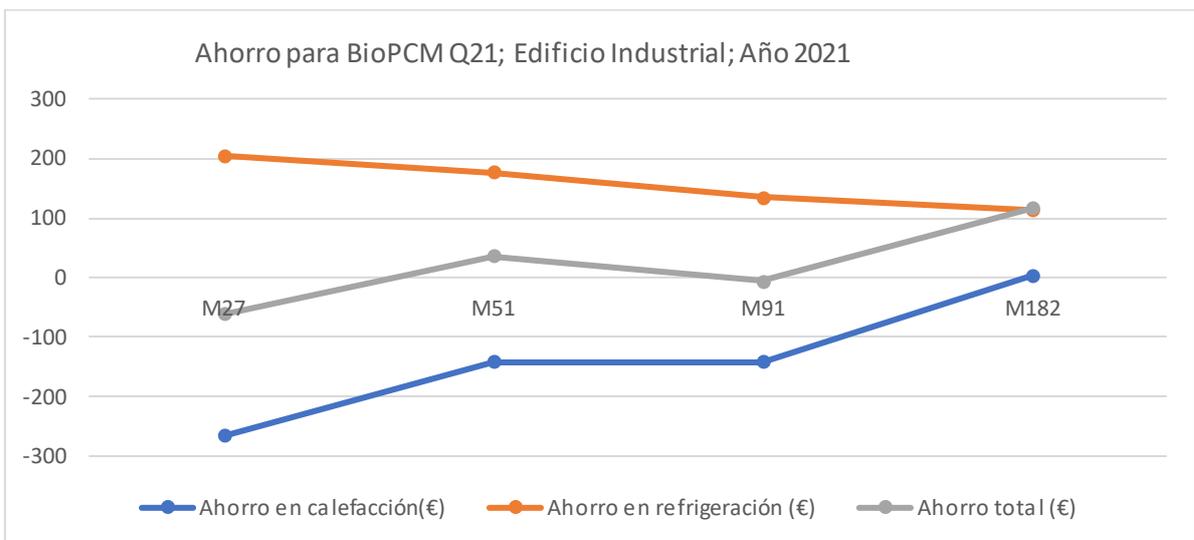


Figura 85. Consumos para BioPCM Q21. Edificio industrial Año 2021

### 5.3. Estudio comparativo entre PCMs con distinta temperatura de fusión

Una vez comprobado que lo más eficiente es utilizar un aislante con mayor espesor, se va a hacer un estudio con todos los PCMs de la gama M182. En este caso va a ir cambiando la temperatura de fusión con cada material, y por tanto las curvas Temperatura-Entalpía.

En la Figura 86 se han representado de manera gráfica las pérdidas en los muros para cada material simulado y para un día muy caluroso en la Región de Murcia como es el uno de agosto. El fin es observar si las pérdidas en un cerramiento eran mayores o menores y por tanto determinar qué material, a priori, parece más eficiente.

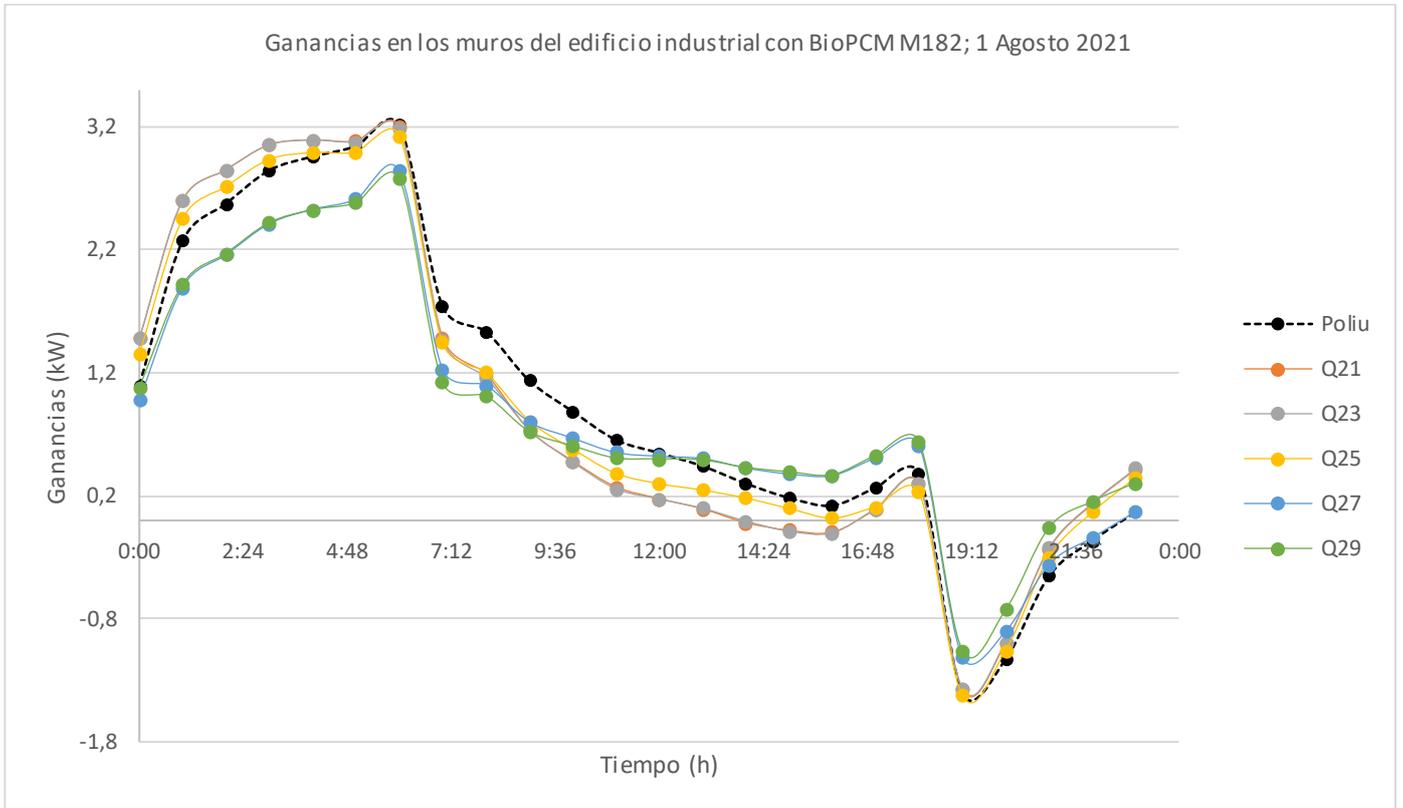


Figura 86. Ganancias en los muros para cada material simulado

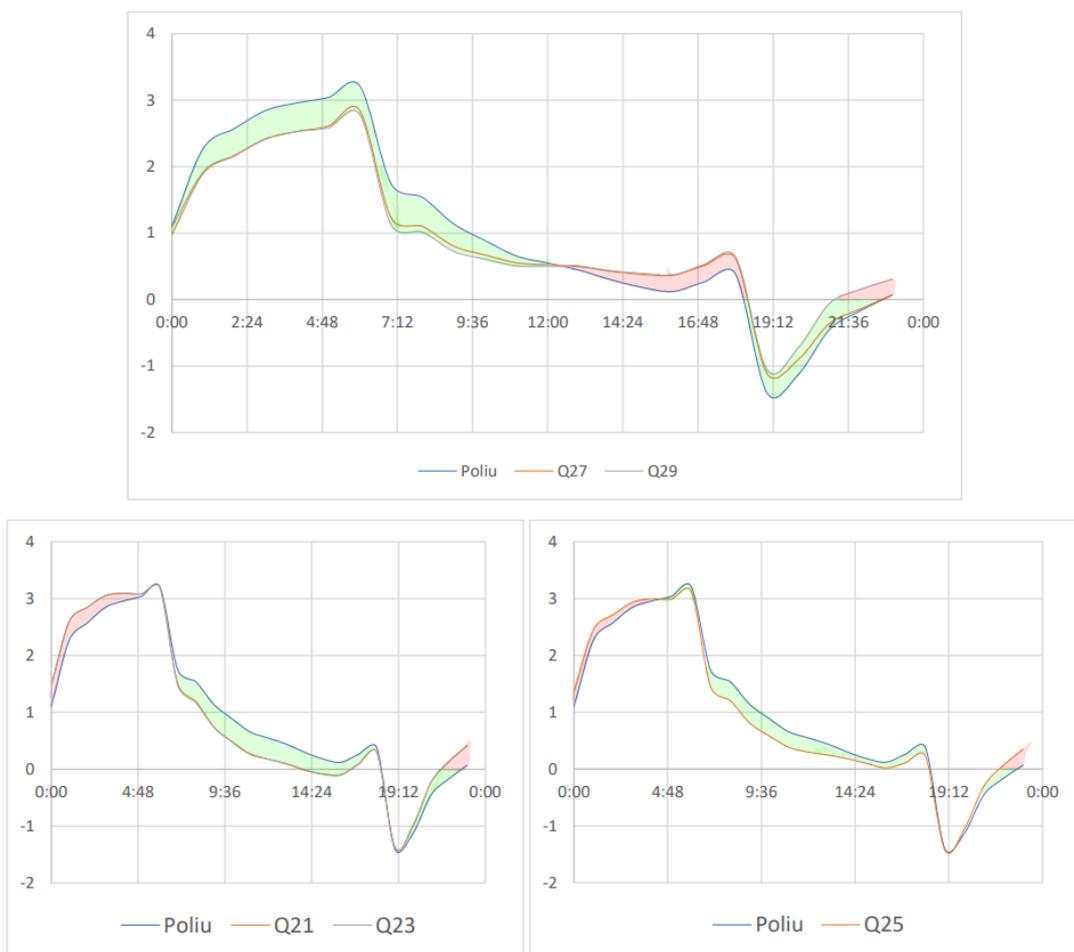
Para que se pueda decir que un panel con PCM es más eficiente que otro con poliuretano, en esta gráfica se debe de observar que el intercambio de calor es menor en módulo. Es decir:

- Cuando hay ganancias de energía (el eje positivo de la gráfica), la curva del panel con PCM se encuentre por debajo de la curva del panel con poliuretano.
- Cuando hay pérdidas de energía (el eje negativo de la gráfica), la curva del panel con PCM se encuentre por encima de la curva del panel con poliuretano.

Este día es muy ilustrativo en cuanto a diferencia entre los PCMs. Apenas se aprecia diferencia entre el Q21 y Q23, y entre Q27 y Q29 se aprecia al final del día. Un detalle

acerca de éstos es que, mientras que lo ideal es que el cruce entre curvas se produzca en el momento de intercambio de calor igual a 0, en la realidad se produce antes. Esto significa que desde aproximadamente las 13:00 h hasta las 18:00, estos PCM son menos eficientes.

En la Figura 87 se puede observar esto de manera más visual. En el mes de agosto, siempre es superior el área verde respecto a la roja, lo que indica que merece la pena utilizar cualquiera de los PCM estudiados. Según esto, el tipo de PCM que utilicemos tendrá una gran repercusión favorable en el consumo de refrigeración.



*Figura 87. Gráfico comparativo de intercambio de calor*

La traducción de estas gráficas a valores numéricos se observa en la Tabla 18, donde se aprecia que el mayor ahorro energético se produce con el BioPCM M182 Q21, con un ahorro en electricidad de 623,571 kWh (7,4%), o lo que es lo mismo, de 112,87€/año.

Edificio Industrial Año 2021	Refrigeración (Electricidad) (kWh)	Refrigeración (Electricidad) (€)	Ahorro (kWh)	Ahorro (€)	Ahorro (%)
<b>Poliuretano</b>	8400,7710	4123,3350	-	-	-
<b>BioPCM M182 Q21</b>	7777,2001	4010,4623	623,5709	112,8728	7,4228
<b>BioPCM M182 Q23</b>	7920,5356	4036,4075	480,2354	86,9276	5,7166
<b>BioPCM M182 Q25</b>	7930,7108	4038,2493	470,0602	85,0858	5,5954
<b>BioPCM M182 Q27</b>	7956,8708	4042,9845	443,9002	80,3505	5,2840
<b>BioPCM M182 Q29</b>	7985,0620	4048,0874	415,7090	75,2476	4,9485

Tabla 18. Consumo anual de refrigeración. Distinto punto de fusión del PCM

Este mismo estudio se puede realizar para algún día de los meses más fríos del año, como es el uno de enero. Si analizamos las curvas representadas en la Figura 88, se observa que en este mes todos los PCMs aíslan prácticamente de la misma manera. Aunque es difícil de valorar, parece que la zona roja es ligeramente superior a la zona verde, lo que querría decir que en el caso de los días fríos, no existe ahorro energético al utilizar materiales de cambio de fase.

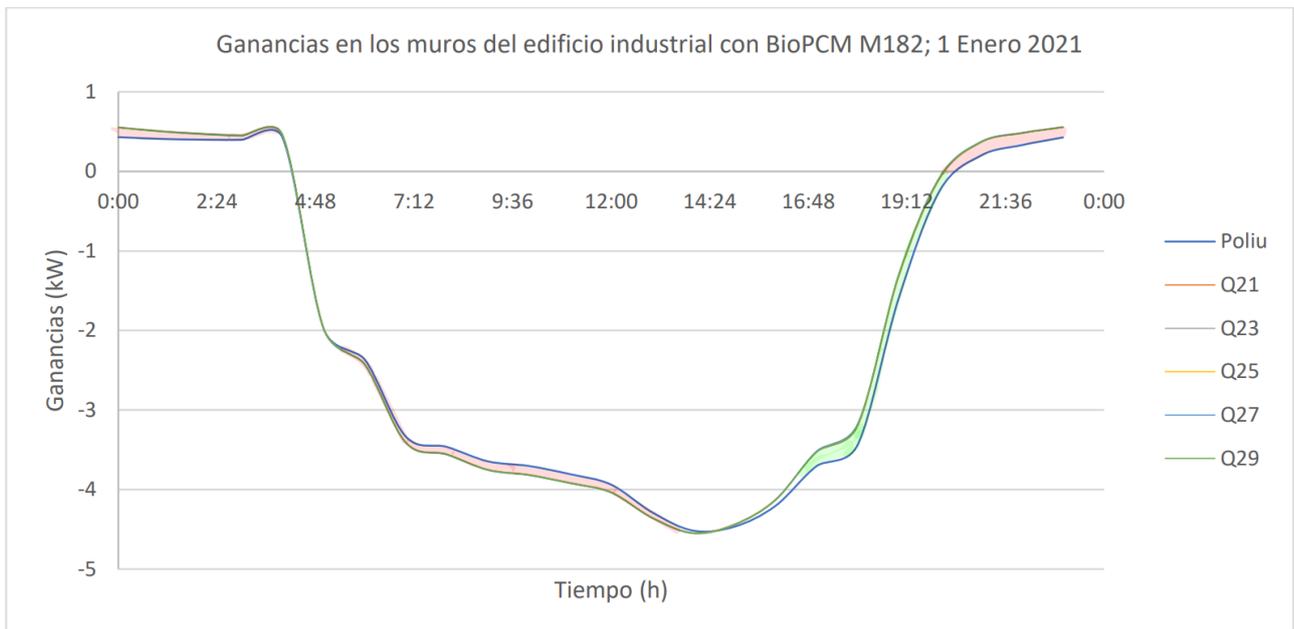


Figura 88. Gráfico comparativo de intercambio de calor

La traducción de esta gráfica se encuentra en la Tabla 19, donde se observa que el único PCM que proporciona ahorro energético es el BioPCM M182 Q21.

Edificio Industrial Año 2021	Calefacción (Gas) (kWh)	Calefacción (Gas) (€)	Ahorro (kWh)	Ahorro (€)	Ahorro (%)
<b>Poliuretano</b>	4670,3976	274,8320	-	-	-
<b>BioPCM M182 Q21</b>	4607,0580	271,7981	63,3396	3,0340	1,3562
<b>BioPCM M182 Q23</b>	4883,6635	285,0475	-213,2659	-10,2154	-4,5663
<b>BioPCM M182 Q25</b>	4908,1238	286,2191	-237,7262	-11,3871	-5,0901
<b>BioPCM M182 Q27</b>	4916,8452	286,6369	-246,4476	-11,8048	-5,2768
<b>BioPCM M182 Q29</b>	4905,5610	234,9764	-235,1634	39,8557	-5,0352

*Tabla 19. Consumo anual de calefacción. Distinto punto de fusión del PCM*

El cómputo global del año se observa en la Figura 89, donde se observan las ganancias (y pérdidas) a lo largo del año 2021. En las zonas remarcadas se observa con mayor claridad que la utilización de un material de cambio de fase es eficiente energéticamente respecto a la utilización de materiales convencionales como el poliuretano. Como se observa en la Tabla 20, el más eficiente de ellos es el BioPCM 182 Q21, con un ahorro de 686 kWh de energía (5%), o lo que es lo mismo, de 115,907/año.

Edificio Industrial Año 2021	Consumo (kWh)	Consumo (€)	Ahorro (kWh)	Ahorro (€)	Ahorro (%)
<b>Poliuretano</b>	13071,1686	4398,1671	-	-	-
<b>BioPCM M182 Q21</b>	12384,2581	4282,2603	686,9105	115,9068	5,2552
<b>BioPCM M182 Q23</b>	12804,1991	4321,4549	266,9695	76,7122	2,0424
<b>BioPCM M182 Q25</b>	12838,8346	4324,4684	232,3340	73,6987	1,7775
<b>BioPCM M182 Q27</b>	12873,7159	4329,6214	197,4527	68,5457	1,5106
<b>BioPCM M182 Q29</b>	12890,6230	4283,0638	180,5456	115,1033	1,3813

*Tabla 20. Cómputo consumo anual. Distinto punto de fusión del PCM*

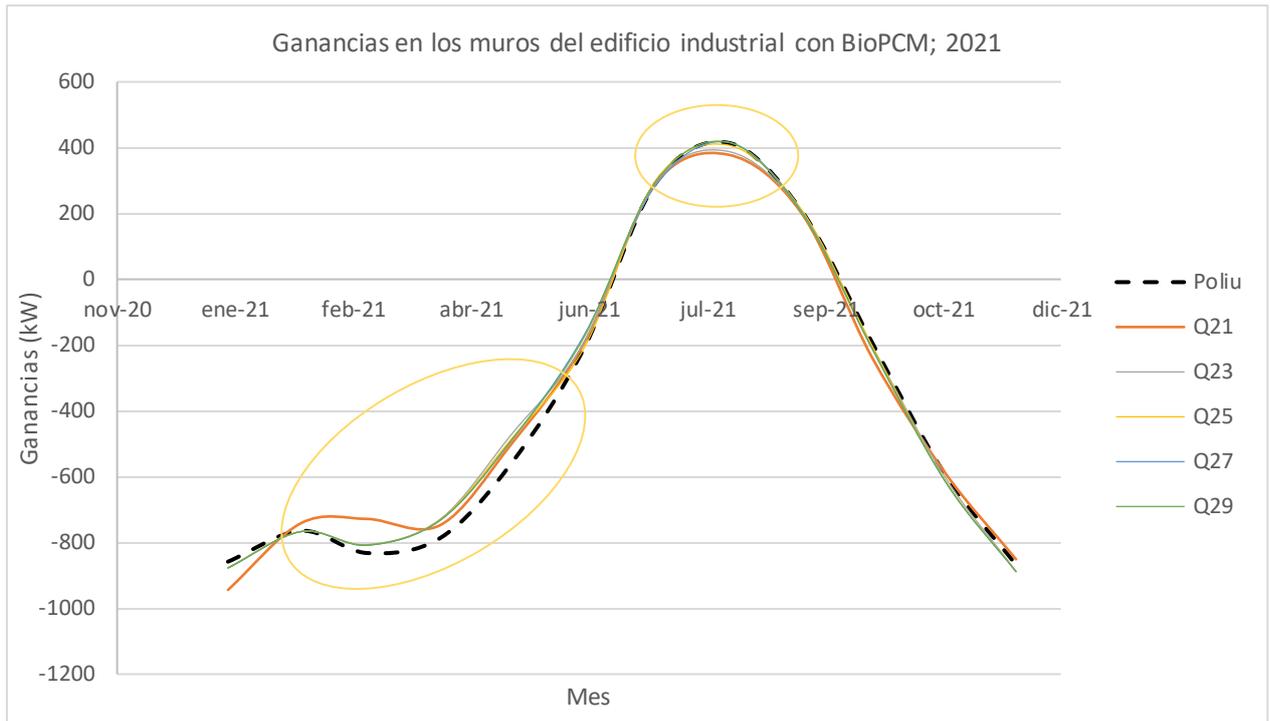
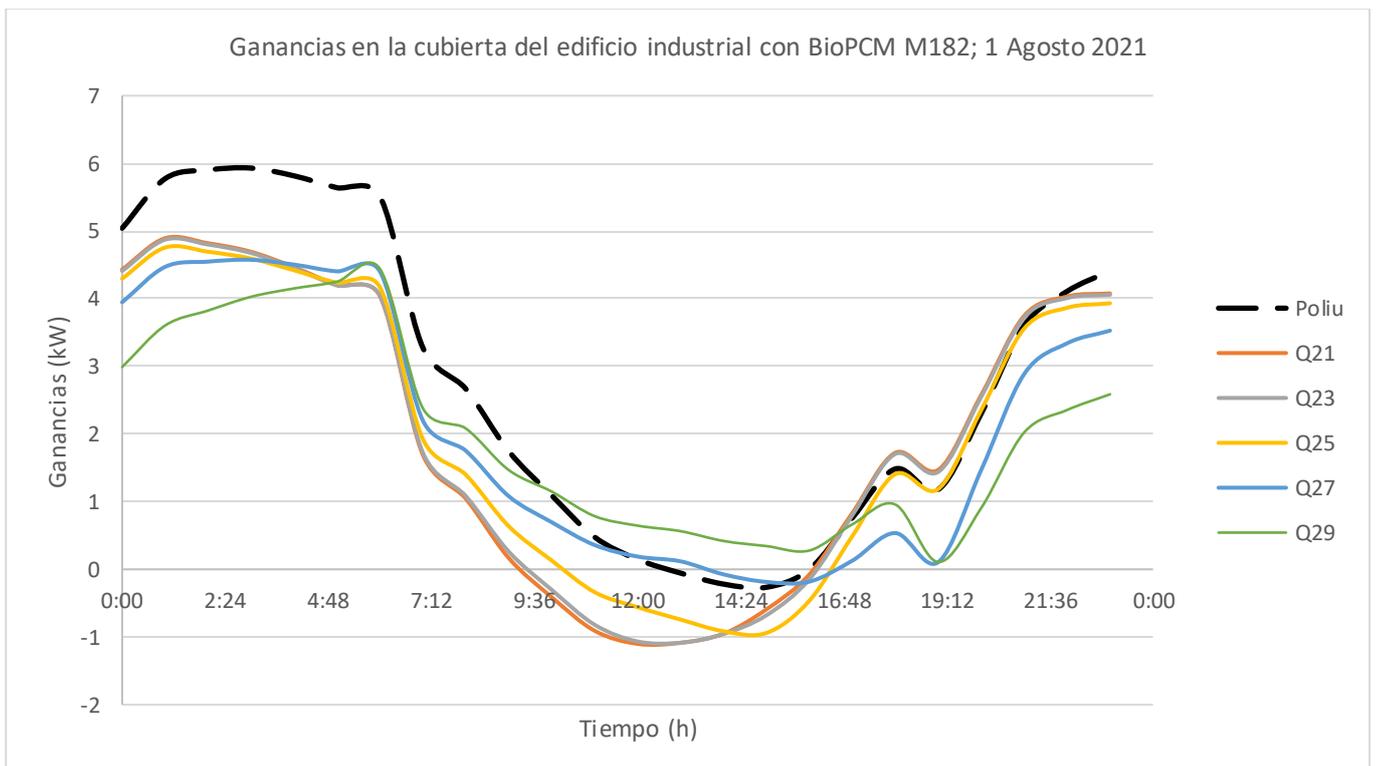


Figura 89. Ganancias en los muros del edificio industrial con PCM

Si se quisiera profundizar un poco más en el tema, otra posibilidad es la de hacer este mismo estudio con el intercambio de calor en la cubierta. De un rápido vistazo a la Figura 90 se intuye que todas las ganancias de calor en la cubierta son menores con el PCM prácticamente a lo largo de todo el día.



## 6. Conclusiones y trabajos futuros

El objetivo final de este trabajo era seleccionar y evaluar materiales que trabajen de manera más eficiente que los utilizados de manera convencional. Para ello, se ha utilizado el programa DesignBuilder que utiliza los datos energéticos procedentes de Energyplus. Como ejemplos de aplicación reales se han tomado dos modelos geométricos diferentes: una vivienda unifamiliar de dos plantas y 120 m<sup>2</sup> en total y una nave industrial de 400 m<sup>2</sup>. Ambas se encuentran situadas en la Región de Murcia.

En los estudios comparativos realizados se ha centrado la atención en el intercambio de calor que existe en los cerramientos de ambos modelos cuando se equipan con un material aislante convencional o con materiales de cambio de fase.

Como resultados del primer estudio comparativo es destacable la diferencia de temperatura que se crea entre las superficies exterior e interior de las estancias ya que el material de cambio de fase absorbe calor a temperatura constante mientras se produce el cambio de fase. Además, el aislamiento es mejor utilizando el PCM y como consecuencia se obtiene un ahorro energético y económico. Sin embargo, este ahorro es prácticamente insignificante en la vivienda unifamiliar estudiada, aunque notorio en la nave industrial. Puesto que esta nave industrial no es especialmente de gran tamaño, cabe pensar que en naves de mayor tamaño el ahorro sería mayor y por tanto la utilización de un material de cambio de fase sería una opción factible para barajar en la fase de diseño.

Con el segundo estudio comparativo se demuestra que, a mayor espesor de la capa de aislamiento, mejor es el ahorro tanto energético como económico. Sin embargo, la conclusión que se obtiene de este estudio es que hay un espesor mínimo a partir del cual la utilización de un material de cambio de fase produce un ahorro efectivo, respecto a uno convencional. Sin embargo, esto supone un encarecimiento del precio a valorar en la compra.

Con el último estudio comparativo se concluye que, para el caso concreto de datos climatológicos de la Región de Murcia y el edificio industrial, el tipo de PCM de la serie de BioPCM M182 con la temperatura de fusión del material de cambio de fase más eficiente energéticamente es el Q21.

Por otro lado, tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, las simulaciones dejan entrever que los edificios estudiados no resultan confortables para los usuarios. Es por eso por lo que una posible continuación del presente proyecto consistiría en optimizar el diseño de calefacción y refrigeración realizando un estudio de confort.

Para la estimación del confort térmico, el método más extendido en la actualidad es el método Fanger. Para ello hace uso de dos índices: PMV (Predicted Mean Vote) o voto estimado medio y PPD (Predicted percentage dissatisfied) o porcentaje de personas insatisfechas, los cuales indican la sensación térmica media de un entorno y el porcentaje de personas insatisfechas en el mismo.

El índice de Fanger PMV es satisfactorio si se encuentra comprendido entre los valores -0,5 y 0,5. Esto indica una sensación térmica confortable para el usuario. Por otro lado, el máximo valor aceptable para el índice PPD es del 10%, lo que dejaría al 90% de las personas satisfechas con la sensación térmica. Los resultados que se muestran tanto para la vivienda unifamiliar como para el edificio industrial muestran que aunque la vivienda se acerca más a una situación de confort térmico, cabría lugar para un proceso de mejora en ambos edificios.

Una posible solución sería la implementación de un sistema HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), una opción que lleva implementado la última versión de DesignBuilder y que permite implementar sistemas de calderas, radiadores, etc.

➤ Nave industrial

**Con PCM (BioPCM M182/Q21)**

	Año
Temperatura del Aire (°C)	21,16
Temperatura Radiante (°C)	20,96
Temperatura Operativa (°C)	21,06
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Humedad Relativa (%)	55,07
PPD de Fanger (%)	32,77
VMP Fanger ()	-0,94

### SIN PCM

	Año
Temperatura del Aire (°C)	21,22
Temperatura Radiante (°C)	21,11
Temperatura Operativa (°C)	21,17
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Humedad Relativa (%)	54,82
PPD de Fanger (%)	32,05
VMP Fanger ()	-0,91

### ➤ Vivienda unifamiliar

### Con PCM (BioPCM M182/Q21)

Temperatura del Aire (°C)	24,02
Temperatura Radiante (°C)	24,71
Temperatura Operativa (°C)	24,36
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Humedad Relativa (%)	44,88
PPD de Fanger (%)	23,63
VMP Fanger ()	0,13

### SIN PCM

Temperatura del Aire (°C)	23,76
Temperatura Radiante (°C)	24,39
Temperatura Operativa (°C)	24,08
Temperatura Ext. BS (°C)	16,94
Humedad Relativa (%)	45,53
PPD de Fanger (%)	23,50
VMP Fanger ()	0,06

## 7. Bibliografía

- [1] «Troyano Moreno Miguel. Introducción a las estructuras de hormigón.pdf».
- [2] H. J. Alqallaf y E. M. Alawadhi, «Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain», *Energy Build.*, vol. 61, pp. 73-80, jun. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.041.
- [3] Y. Konuklu, M. Ostry, H. O. Paksoy, y P. Charvat, «Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications», *Energy Build.*, vol. 106, pp. 134-155, nov. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.019.
- [4] A. Gharsallaoui, G. Roudaut, O. Chambin, A. Voilley, y R. Saurel, «Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview», *Food Res. Int.*, vol. 40, n.o 9, pp. 1107-1121, nov. 2007, doi: 10.1016/j.foodres.2007.07.004.
- [5] M. Pomianowski, P. Heiselberg, y R. L. Jensen, «Dynamic heat storage and cooling capacity of a concrete deck with PCM and thermally activated building system», *Energy Build.*, vol. 53, pp. 96-107, oct. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.007.
- [6] C. Barreneche et al., «Comparison of three different devices available in Spain to test thermal properties of building materials including phase change materials», *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 421-427, sep. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.061.
- [7] C. Voelker, O. Kornadt, y M. Ostry, «Temperature reduction due to the application of phase change materials», *Energy Build.*, vol. 40, n.o 5, pp. 937-944, ene. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.07.008.
- [8] C. Castellón et al., «Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels», *Renew. Energy*, vol. 35, n.o 10, pp. 2370-2374, oct. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2010.03.030.
- [9] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, y O. Zubillaga, «Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings», *Energy Build.*, vol. 39, n.o 2, pp. 113-119, feb. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.030.

- [10] U. Stritih, V. V. Tyagi, R. Stropnik, H. Paksoy, F. Haghghat, y M. M. Joybari, «Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings», *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, pp. 286-295, ago. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.036.
- [11] H.-M. Chou, C.-R. Chen, y V.-L. Nguyen, «A new design of metal-sheet cool roof using PCM», *Energy and Buildings*, vol. 57, pp. 42-50, feb. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.10.030.
- [12] «ANALYSIS\_OF\_THE\_SIMULATION\_MODELS\_FOR\_THE\_USE\_OF\_P.pdf».
- [13] P. Devaux y M. M. Farid, «Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter», *Applied Energy*, vol. 191, pp. 593-602, abr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.060.
- [14] «Caracterización térmica de muros y simulación energética de un edificio histórico.pdf».
- [15] A. Oliver, F. J. Neila, y A. García-Santos, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica», *Mater. construcc.*, vol. 62, n.o 305, pp. 131-140, mar. 2012, doi: 10.3989/mc.2012.58010.
- [16] «EDWIN\_ISRAEL\_RODRIGUEZ\_UBINAS.pdf».
- [17] S. Pilehvar et al., «Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials», *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 94-103, mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.057.
- [18] «EHE-08.pdf».
- [19] D. B. Crawley et al., «EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program», *Energy and Buildings*, vol. 33, n.o 4, pp. 319-331, abr. 2001, doi: 10.1016/S0378-7788(00)00114-6.
- [20] R. E. H. Sebastián, «ESTUDIO DEL CONFORT TÉRMICO MEDIANTE SIMULACIÓN VALIDADA DE UNA EDIFICACIÓN TIPO CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE EN LA ENVOLVENTE EN VARIAS ZONAS CLIMÁTICAS DEL ECUADOR», p. 88.

- [21] T. Ahmad, S. L. Plee, y J. P. Myers, «Fluent User's Guide», p. 2692.
- [22] E. Leang, P. Tittlein, L. Zalewski, y S. Lassue, «Impact of a Composite Trombe Wall Incorporating Phase Change Materials on the Thermal Behavior of an Individual House with Low Energy Consumption», *Energies*, vol. 13, n.o 18, p. 4872, sep. 2020, doi: 10.3390/en13184872.
- [23] U. Stritih, V. V. Tyagi, R. Stropnik, H. Paksoy, F. Haghghat, y M. M. Joybari, «Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings», *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 286-295, ago. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.036.
- [24] M. Ning, H. Jingyu, P. Dongmei, L. Shengchun, y S. Mengjie, «Investigations on thermal environment in residential buildings with PCM embedded in external wall», *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1888-1895, dic. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.387.
- [25] Z. A. Al-Absi, M. H. Mohd Isa, y M. Ismail, «Phase Change Materials (PCMs) and Their Optimum Position in Building Walls», *Sustainability*, vol. 12, n.o 4, p. 1294, feb. 2020, doi: 10.3390/su12041294.
- [26] L. Estrella, A. Martínez, y E. Sevilla, «REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA: LOS PCM PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN EDIFICACIÓN», p. 8.
- [27] J. Hun Park, S. Wi, B. Yeol Yun, S. Yang, J. Lee, y S. Kim, «Simulation-based analysis of optimized PCM to improve building energy performance and indoor thermal environment», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 609, p. 042056, oct. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/609/4/042056.
- [28] M. Saffari, A. de Gracia, C. Fernández, y L. F. Cabeza, «Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings», *Applied Energy*, vol. 202, pp. 420-434, sep. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.107.

[Tarifas 3.1 de gas en 2021: Precios, Ofertas y Descuentos \(preciogas.com\)](https://www.preciogas.com)

[Tarifas de gas natural 3.2: Precios, Ofertas y Descuentos \(preciogas.com\)](https://www.preciogas.com)

# ANEXO: Resultados y especificaciones de Designbuilder

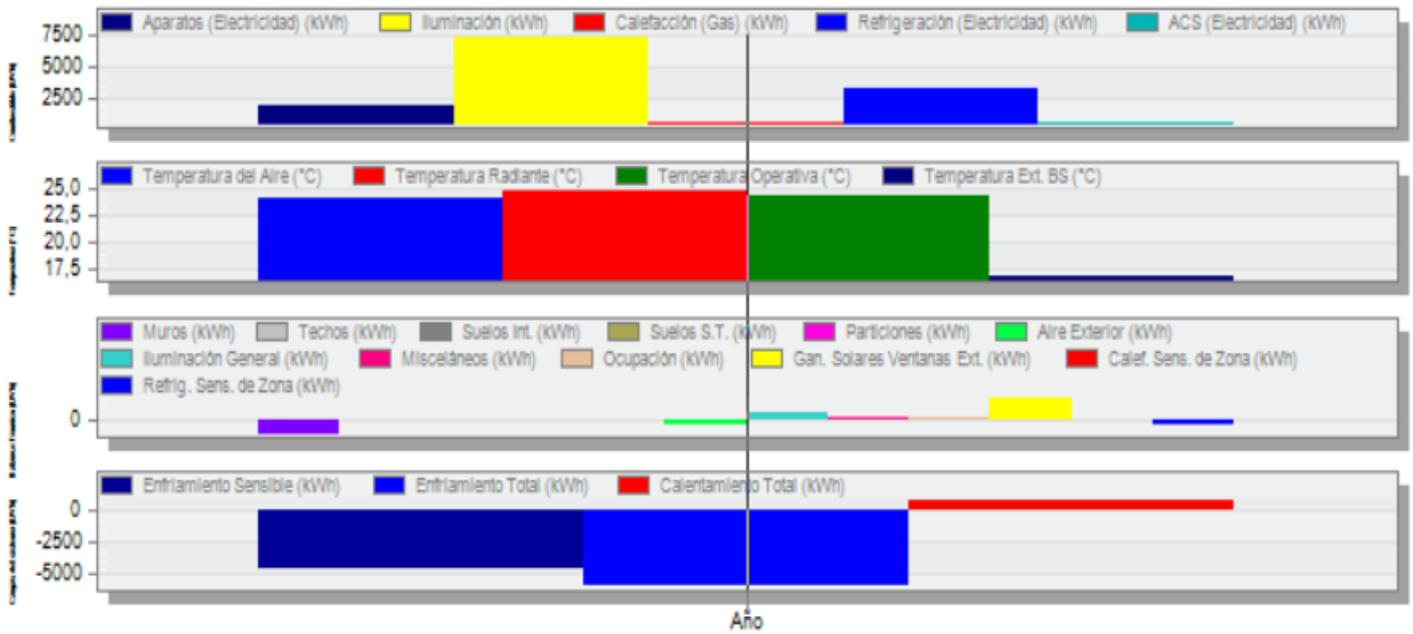
## ➤ Vivienda unifamiliar

### Con PCM (BioPCM M182/Q21)

#### Temperaturas, Ganancias de Calor y Consumo Energético - Vivienda unifamiliar, Edificio 1

1 Ene - 31 Dic, Período de simulación

Evaluación



#### Temperaturas y Pérdidas de Calor

Evaluación



# SIN PCM

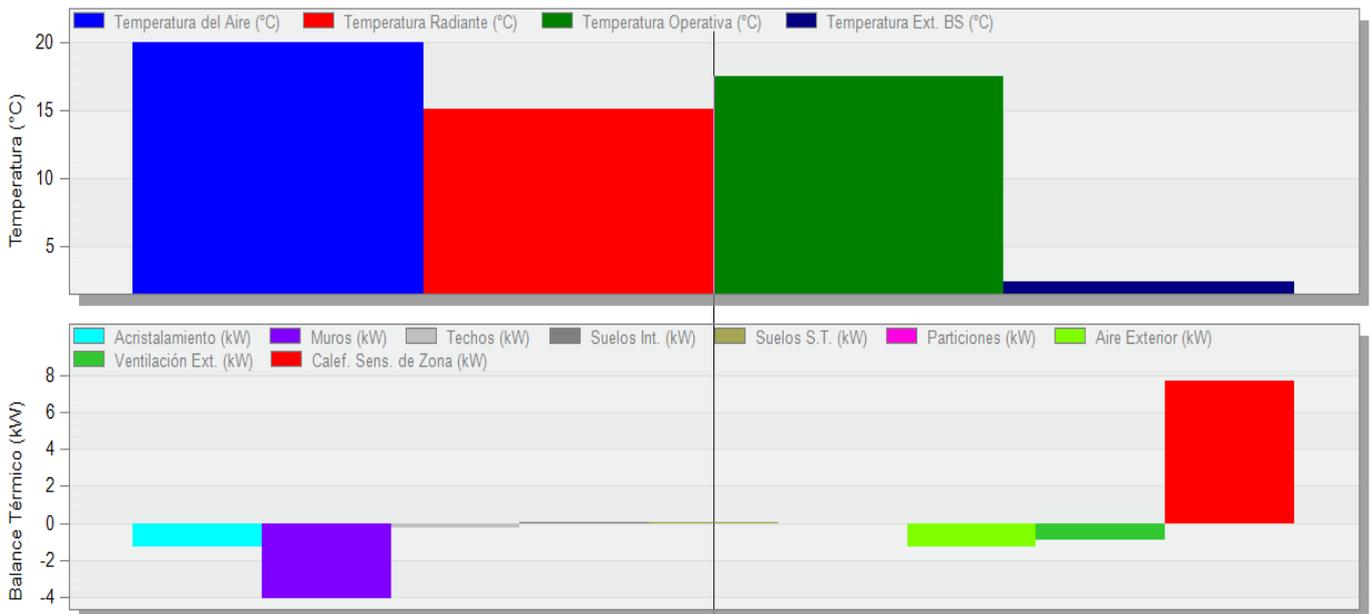
Temperaturas, Ganancias de Calor y Consumo Energético - Vivienda unifamiliar, Edificio 1  
1 Ene - 31 Dic, Período de simulación

Evaluación



## Temperaturas y Pérdidas de Calor

Evaluación

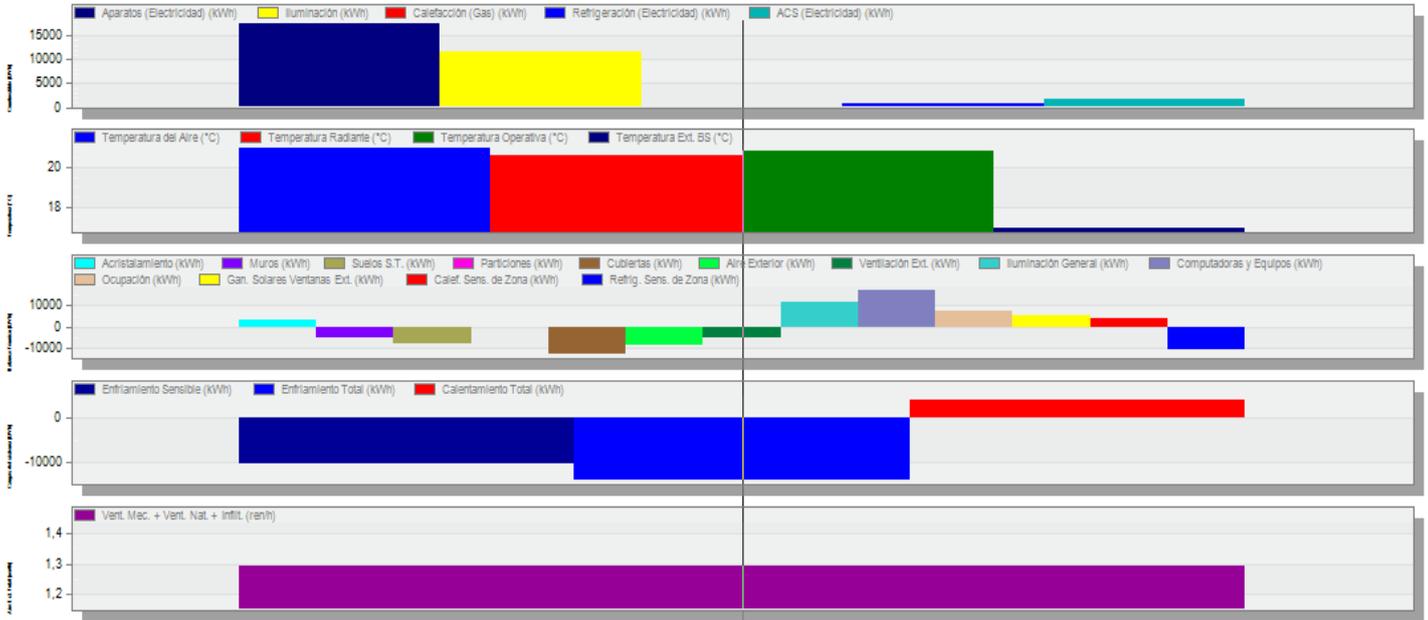


➤ Edificio industrial

CON PCM

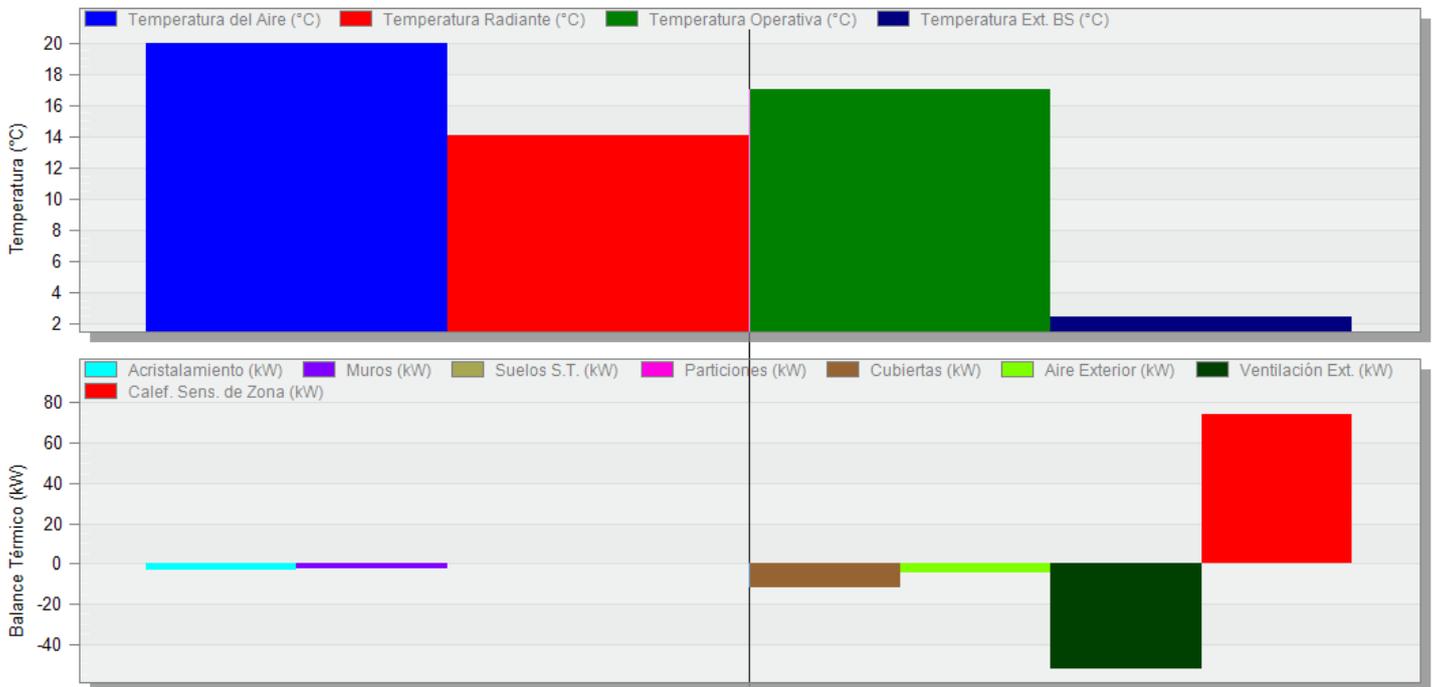
Temperaturas, Ganancias de Calor y Consumo Energético - Edificio Industrial, PCM  
1 Ene - 31 Dic, Período de simulación

Evaluación



Temperaturas y Pérdidas de Calor

Evaluación



## SIN PCM

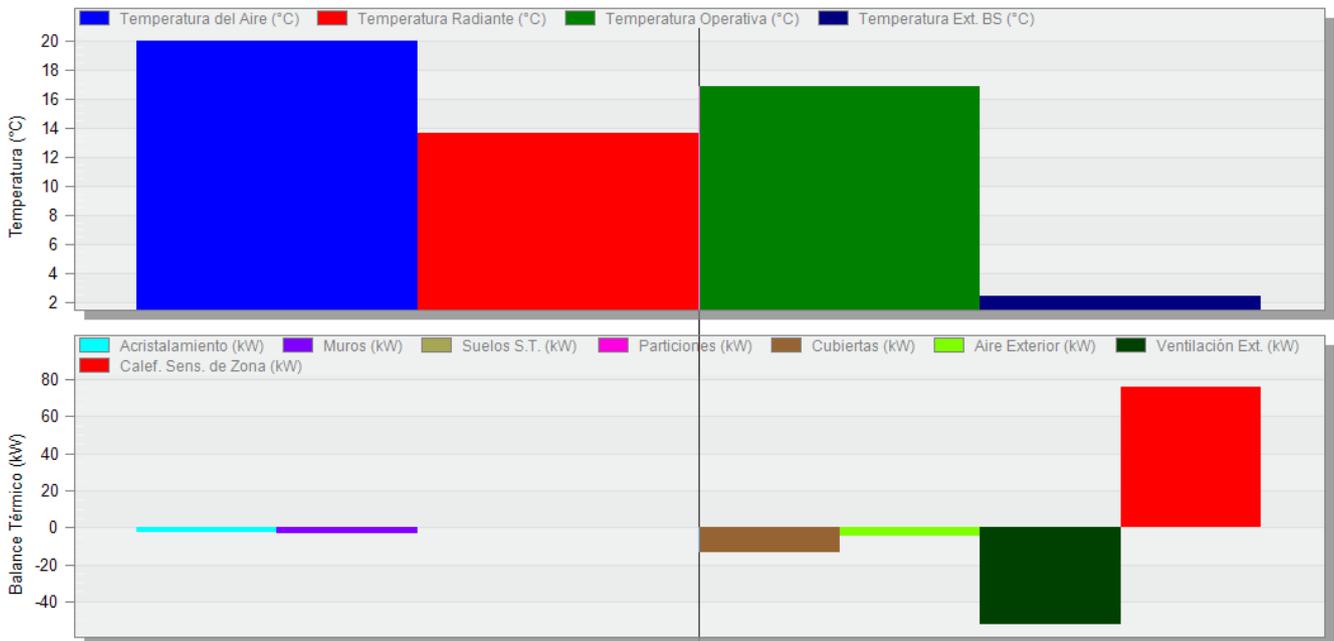
Temperaturas, Ganancias de Calor y Consumo Energético - Edificio Industrial, Sin PCM  
1 Ene - 31 Dic, Período de simulación

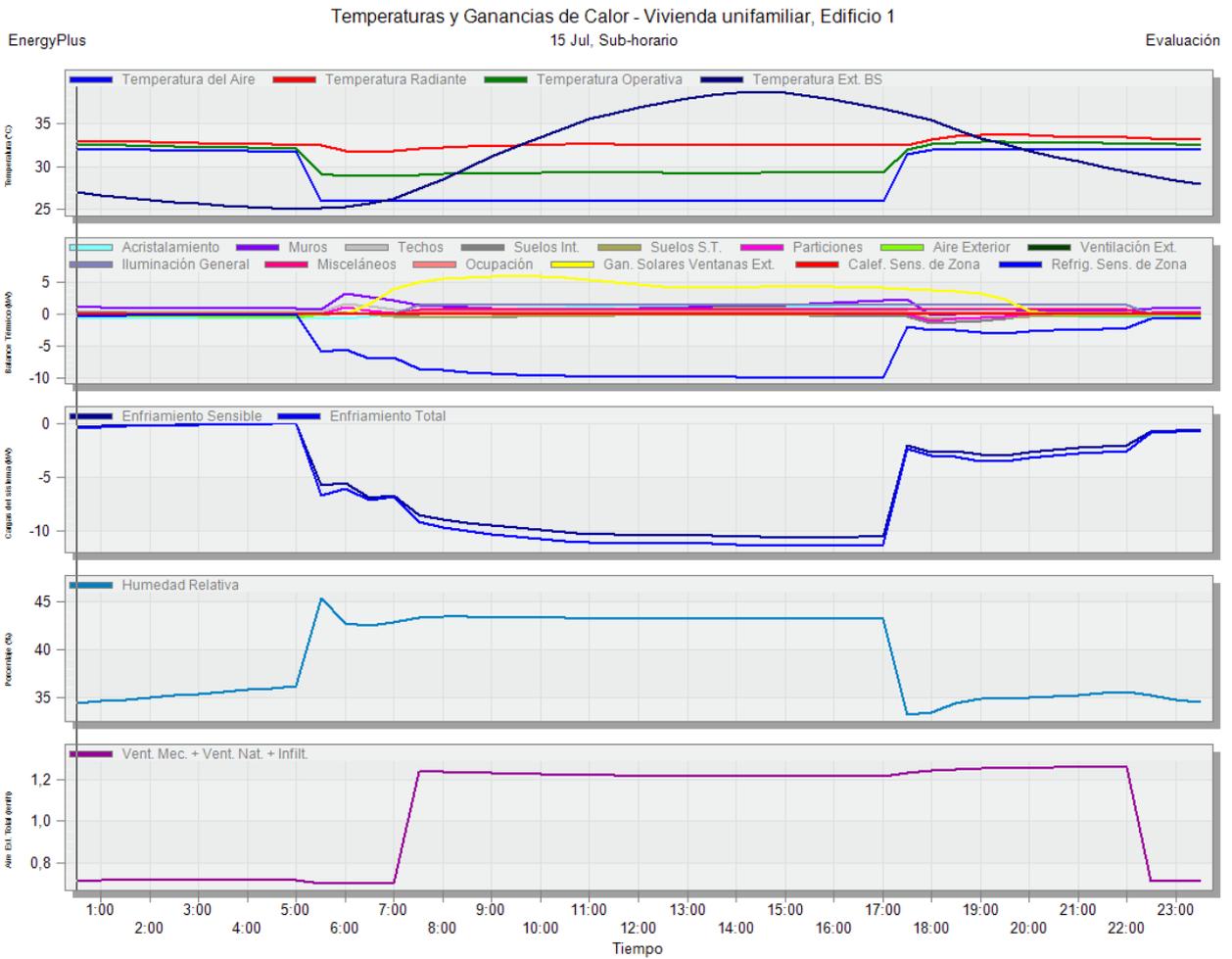
Evaluación



## Temperaturas y Pérdidas de Calor

Evaluación





**Opciones de Cálculo**

General | Opciones | Resultados | Administrador de Simulaciones

**Resultados**

- Datos de zonas en edificio y bloque
- Incluir zonas desocupadas en totales y promedios de bloques y edificio
- Permitir resultados personalizados

**Resultados con Gráficas**

**Energía**

- Transferencia de calor en superficies
- Ganancias internas y solares
- Cargas y consumos HVAC
- Cargas latentes

**Resultados de Superficies y Aberturas del Edificio**

- Almacenar resultados de superficies
- Almacenar resultados de aberturas y sub-superficies

**Confort y Ambiente**

Periodo de informe: 1-Todos los periodos

- Ambiental
- Renovaciones de aire
- Simple Estándar ASHRAE 55
- Adaptativo Estándar ASHRAE 55
- Adaptativo Estándar CEN 15251
- CIBSE TM52
- CIBSE TM59
- Fanger
- Pierce, dos-nodos
- Kansas State University, dos-nodos
- Distribución de temperaturas

Periodo de informe: 1-Todos los periodos

Resultados de Luz Natural

Mapa de luz natural

Datos de factor de luz diurna, iluminancia y deslumbramiento

Tablas de Resumen

Unidades 1-kWh

Tablas de Resumen Anual

- All Summary
- Resumen LEED
- Annual Building Utility Performance Summary (ABUPS)
- Demand End Use Components Summary
- Resumen de ganancias de calor sensible
- Input Verification and Results Summary
- Source Energy End Use Components Summary
- Adaptive Comfort Summary
- Zone Component Load Summary
- Standard 62.1 Summary
- Energy Meters
- Climatic Data Summary
- Equipment Summary
- Envelope Summary
- Surface Shadowing Summary
- Shading Summary
- Lighting Summary
- HVAC Sizing Summary
- System Summary
- Component Sizing Summary
- Outdoor Air Summary
- Object Count Summary
- Component Cost Economics Summary

Tablas de Resumen Mensual

- All Monthly
- Zone Cooling Summary Monthly
- Zone Heating Summary Monthly
- Zone Electric Summary Monthly
- Space Gains Monthly
- Peak Space Gains Monthly
- Space Gain Components At Cooling Peak Monthly
- Energy Consumption Electricity Natural Gas Monthly
- Energy Consumption Electricity Generated Propane Monthly
- Energy Consumption Diesel Fuel Oil Monthly
- Energy Consumption District Heating Cooling Monthly
- Energy Consumption Coal Gasoline Monthly
- End Use Energy Consumption Electricity Monthly
- End Use Energy Consumption Natural Gas Monthly
- End Use Energy Consumption Diesel Monthly
- End Use Energy Consumption FuelOil Monthly
- End Use Energy Consumption Coal Monthly
- End Use Energy Consumption Propane Monthly
- End Use Energy Consumption Gasoline Monthly
- End Use Energy Consumption Other Fuels Monthly
- Peak Energy End Use Electricity Part1 Monthly
- Peak Energy End Use Electricity Part2 Monthly
- Electric Components Of Peak Demand Monthly
- Peak Energy End Use Natural Gas Monthly
- Peak Energy End Use Diesel Monthly
- Peak Energy End Use Fuel Oil Monthly
- Peak Energy End Use Coal Monthly
- Peak Energy End Use Propane Monthly
- Peak Energy End Use Gasoline Monthly
- Peak Energy End Use Other Fuels Monthly