

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



Universidad de Concepción



Departamento de
Ingeniería Mecánica

PROYECTO PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CS. DE LA ING. CON
MENCIÓN EN ING. MECÁNICA

**“Análisis del uso de materiales con cambio de fase en la envolvente térmica de
una vivienda.”**



Diego Sarabia Méndez

Autor

Einara Blanco Machin

Profesor Guía

Doctor en Ingeniería Mecánica

Adelqui Fissore Schiappacasse

Profesor Co-Guía

Doctor en Ciencias Aplicadas

Concepción, 24 de Agosto de 2020.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer al Sr. Adelqui Fissore Schiappacasse y Sra. Blanco Machin Einara la oportunidad que me han brindado para realizar este proyecto y aprender de él, y al Director programa magister Sr. Cristian Molina Vicuña quien me dio la oportunidad de ingresar y apoyarme en el programa de Magister del Departamento de Ingeniería Mecánica.

A mis padres Sr. Marcos Sarabia y Sra. Olga Méndez, por todo lo que me han tenido que sostener durante estos años de carrera, porque han sabido orientarme y sus consejos siempre me han ayudado, los amo.

Y a mí polola Srta. Estefanía Cisternas, por tu apoyo y tu paciencia han sido muy importantes para mí.





RESUMEN

Los materiales de cambio de fase (PCM) juegan un papel importante en la reducción del consumo energético en el sector de la construcción. Se consideran prometedores para almacenar y descargar energía térmica. Usando el software Energy Plus, se evaluó el comportamiento térmico de dos sistemas de climatización en una vivienda de estudio aplicando materiales de cambio de fase a las paredes exteriores.

Se observó que la temperatura de fusión de 22 °C cercana a la temperatura de confort térmico es la más óptima, esto ayudo a mejorar el rendimiento del material PCM evitando la histéresis o sub-enfriamiento.

Además, se configuró el sistema constructivo del muro exterior con respecto a la ubicación del PCM en la envolvente interior. También, el diseño de la solución de construcción con PCM está optimizado en relación con los datos de zonificación y soluciones constructivas del MINVU. Para este estudio se escogió el PCM 22HC ya que su comportamiento es ideal para la vivienda en estudio, arrojando un 31,9% (de 2,63 kW a un 1,79 kW) de reducción de potencias máximas de diseño en climatización. De acuerdo al PCM escogido se analizó el comportamiento del consumo energético en dos sistemas de climatización. Caso 1 Sistema calefacción a leña, mostro una reducción del consumo energético de 34,1% (de 3694 kWh a un 2434 kWh). Para el segundo caso, se evaluó un sistema de bomba de calor multisplit, al igual que en el caso anterior el material optimo corresponde al PCM 22HC, se observa una disminución de consumo energético de un 34,4% (de 688 kWh a un 451 kWh) en comparación al caso base, lo que implica una notable reducción de los consumos energéticos en la estación fría. Además, junto con los valores de consumo energético, se evaluó los costos de operación anual arrojando una disminución promedio de 34 % debido al aporte de los PCM.



Estos datos demostraron una reducción significativa en energía y contribuyen a la eficiencia energética. Se puede inferir que los PCM aportan significativamente al medio ambiente en liberar menos cantidad de material particulado, reducir el consumo de combustibles fósiles y disminuir el CO₂ liberado a la atmosfera.

Palabras clave: Materiales de cambio de fase, Sustentabilidad, Construcción de simulación térmica, Eficiencia energética, Vivienda de alta inercia térmica.





ABSTRACT

Phase change materials (PCM) play an essential role in reducing energy consumption in the construction sector. They are considered promising for storing and discharging thermal energy. Using the Energy Plus software, the thermal behavior of two air conditioning systems in a study home was evaluated by applying phase change materials to the exterior walls.

It was observed that the melting temperature of 22 ° C close to the thermal comfort temperature is the most optimal, this helped to improve the performance of the PCM material avoiding hysteresis or sub-cooling.

Besides, the construction system of the exterior wall was configured concerning the location of the PCM in the interior envelope. Also, the design of the construction solution with PCM is optimized in relation to the zoning data and construction solutions of the MINVU. For this study, the PCM 22HC was chosen as its behavior is ideal for the dwelling under study, yielding a 31.9% (from 2.63 kW to 1.79 kW) reduction in maximum design powers in air conditioning. According to the chosen PCM, the behavior of energy consumption in two air conditioning systems was analyzed. Case 1 Wood heating system, showed a reduction in energy consumption of 34.1% (from 3694 kWh to 2434 kWh). For the second case, a multisplit heat pump system was evaluated, as in the previous case, the optimal material corresponds to the PCM 22HC, a decrease in energy consumption of 34.4% (from 688 kWh to 451 kWh) compared to the base case, which implies a notable reduction in energy consumption in the cold season. Besides, together with the energy consumption values, the annual operating costs were evaluated, yielding an average decrease of 34% due to the contribution of the PCM.



These data demonstrated a significant reduction in energy and contribute to energy efficiency. It can be inferred that PCM contributes significantly to the environment in releasing less particulate matter, reducing the consumption of fossil fuels and reducing the CO₂ released into the atmosphere.

Key words: Phase change materials, Sustainability, Thermal simulation construction, Energy efficiency, High thermal inertia housing.





ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	4
ÍNDICE DE CONTENIDOS	6
INDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE TABLAS	11
INTRODUCCION	12
CAPITULO I: ENUNCIADO DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.1 Planteamiento del problema	16
1.2 Preguntas de investigación	19
1.3 Hipótesis	19
1.4 Objetivos	20
1.4.2 Objetivos específicos	20
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1. Marco Teórico	22
2.2 Materiales con cambio de fase (PCM)	22
2.2.1 Funcionamiento	23
2.2.2 Propiedades	24
2.2.3 Almacenamiento de energía térmica	25
2.2.4 Clasificación	26
2.2.4.1 PCM inorgánicos: sales hidratadas	27



2.2.4.2	PCM orgánicos: parafinas, ácidos grasos y mezclas orgánicas .	29
2.2.4.2.1	Parafinas	31
2.2.4.2.2	Ácidos Grasos	31
2.2.4.2.3	Mezclas eutécticas	32
2.3	Criterios de selección de los Materiales con Cambio se Fase.....	33
2.4	Vida útil del material cambio fase.	34
2.5	Aplicación en la construcción.	35
2.6	Encapsulación.....	37
2.6.1	Microcápsulas.....	38
2.6.2	Macrocápsulas.....	39
CAPITULO III: MÉTODOS Y METODOLOGÍA.....		40
3.1	Herramienta de simulación de energía.	41
3.2	Descripción Vivienda en estudio.....	43
3.2.1	Método de zona en software EnergyPlus.	46
3.3	Datos meteorológicos.	47
3.4	Jornadas de ocupación.	48
3.5	Configuración envolvente por elemento y sistemas de climatización.....	49
3.6	Caracterización PCM.	51
3.6.1	Selección de Materiales Cambio Fase.....	52
3.6.2	Configuración del PCM en EnergyPlus.	54
3.6.3	Cotización PCM RT21.....	55
3.7	Caracterización Macro encapsulación.	56



3.7.1 Cotización Macro encapsulación.....	56
3.8 Validación muro constructivo con PCM.	57
3.8.1 Cumplimiento de la O.G.U.C. y Resistencia al fuego.	58
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	62
4.1 Comportamiento Energéticos de los materiales cambio fase.	63
4.1.1 Rendimiento energético de calefacción con y sin PCM.....	63
4.1.2 Inversión inicial y costos operativos en sistemas de calefacción con y sin PCM.....	67
4.2 Propuesta de aplicación PCM a caso base como sistema de actualización.....	68
CONCLUSIONES.	70
REFERENCIAS.	72





INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de proceso de cambio de fase Hielo – Vapor.....	23
Figura 2.2: Clasificación de los Materiales Cambio Fase.....	26
Figura 2.3: Estabilización de la temperatura interior de un edificio por el efecto de la inercia térmica	36
Figura 2.4: Espesor requerido de distintos materiales Vs Energía termina. ...	36
Figura 2.5: Microcápsulas.....	38
Figura 2.6: Cápsulas de macro PCM (Contenedor plano, Esfera, Placas de barra doble).....	40
Figura 3.1: Descripción Vivienda en estudio.	44
Figura 3.2: Modelo de zona en casa de estudio.	46
Figura 3.3: Zona y sub-superficie de vivienda en estudio.	47
Figura 3.4: Configuración datos meteorológico.....	48
Figura 3.5: Planilla de uso horario de un recinto.....	49
Figura 3.6: Planilla configuración envolvente por elemento.....	50
Figura 3.7: Planilla configuración rango de temperatura confort térmico... ..	51
Figura 3.8: Planilla configuración del tipo de sistema de climatización.. ..	51
Figura 3.9: Configuración del PCM en el software.	54
Figura 3.10: Cotización del material RT21.....	55
Figura 3.11: Modulo Almacenamiento Macro encapsulación.	56
Figura 3.12: Cotización Macro encapsulación.....	57
Figura 3.13: Sistema Constructivo Muro exterior con PCM en vivienda estudio..	61



Figura 4.1 (a): Potencia máxima diseño con y sin PCM en vivienda estudio..	64
Figura 4.1 (b): Caso 1 - Consumo energético en calefacción Leña con y sin PCM en vivienda estudio.....	65
Figura 4.1 (c): Caso 2 - Consumo energético Bomba de calor con y sin PCM en vivienda estudio.....	66
Figura 4.2: Inversión inicial y costos operativos sistema climatización con y sin PCM en vivienda estudio.....	68





INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Ventajas e inconvenientes de los PCM inorgánicos.....	28
Tabla 2.2: Temperatura de fusión de algunas sales hidratadas.....	29
Tabla 2.3: Ventajas e inconvenientes de los PCM orgánicos.....	30
Tabla 2.4: Temperatura de fusión de algunas parafinas.	31
Tabla 2.5: Temperatura de fusión de algunos ácidos grasos	32
Tabla 2.6: Clasificación de los PCMs.	32
Tabla 2.7: Ventajas e inconvenientes de las microcapsulas.....	38
Tabla 2.8: Ventajas e inconvenientes de las Macrocapsulas.	39
Tabla 3.1: Resumen superficies de los distintos espacios vivienda en estudio.	44
Tabla 3.2: Cumplimiento de la envolvente elementos constructivos de la vivienda en estudio.....	44
Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de PCM a utilizar.....	52
Tabla 3.4: Clasificación de los edificios según su destino, superficie edificada y número de pisos... ..	58
Tabla 3.5: Resistencia al fuego para diferentes elementos de construcción. .	59
Tabla 3.6: Tabique perimetral estructura madera en vivienda en estudio.....	60



INTRODUCCION

Debido al avance de la ciencia y la tecnología, la calidad de vida y los sistemas de producción en la industria han mejorado, lo que ha aumentado el consumo mundial de energía, en países industrializados y las economías emergentes. Este aumento en el consumo de energía tiene efectos nocivos sobre el medio ambiente, como el aumento de las emisiones de gases a la atmósfera, entre otros. Por lo tanto, los países están promoviendo cada vez más nuevas políticas energéticas y promoviendo dos tipos de acciones para reducir las emisiones, entre otras.: aumentar la proporción de energía renovable y promover medidas de ahorro y eficiencia energética. Debido a las crecientes preocupaciones sobre el consumo de energía, se necesita urgentemente más investigación.

Entre las medidas de eficiencia energética, surge la necesidad de estudiar el uso de energía solar a través de la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM, según sus siglas en inglés, Phase Change Materials). Estudios recientes sobre materiales de cambio de fase han demostrado que hay varios aspectos para mejorar en la aplicación y caracterización de estos materiales (Anisur, 2013).

Actualmente, el sector de la construcción contribuye considerablemente al consumo total de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Los edificios consumen más del 40% de la energía primaria del mundo, que es responsable del 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Thorpe, 2011).

A nivel local, el sector residencial es responsable de las altas demandas energéticas, equivalente a 23% del consumo energético nivel país. Del parque habitacional existente en Chile, 75% fue construido sin consideraciones térmicas y de eficiencia energética, dicha situación provoca que el usuario asuma el costo



del consumo energético en calefacción y refrigeración para mantener la vivienda en zona confort (Wegertseder, 2015).

Tradicionalmente, el consumo de energía se reduce mediante el uso de aislamiento térmico de alta calidad en la envolvente de un edificio para reducir la transferencia de calor entre el interior y exterior (Zhou. D.. Tian. Y.. Qu. Y.. & Chen. Y. K, 2016). Un aumento en la eficiencia de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) también ha sido responsable de una reducción en el consumo de energía, sin embargo, las mejoras en la eficiencia energética no deben limitarse a estos enfoques.

Un estudio de investigación describió que el aumento de la inercia térmica del edificio reduce la cantidad de energía utilizada para calefacción y refrigeración (Ling. H.. Chen. C.. Qin. H.. Wei. S.. Lin. J.. Li. N.), ya que reduce las fluctuaciones en la temperatura interior, ayudando a mantener el espacio interno dentro del rango de confort térmico y reduciendo la necesidad de utilizar sistemas de aire acondicionado.

El almacenamiento de energía se puede implementar mediante calor sensible, aumentando y disminuyendo la temperatura de los recubrimientos de edificios, o mediante calor latente. Con la inclusión de materiales de cambio de fase conduce a una mayor densidad de energía térmica. Los materiales de cambio de fase están asociados con el almacenamiento de calor latente (LHS) con su principal ventaja de tener una alta densidad de almacenamiento a temperatura constante. Por lo tanto, los materiales de cambio de fase han demostrado que su almacenamiento de energía térmica latente se puede utilizar para calentar y enfriar a sistemas de construcción pasivos o activos (B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling, 2003).

Investigaciones más recientes han estudiado sus propiedades físicas, químicas, cinéticas y especialmente térmicas para seleccionar el material de cambio de fase más adecuado para la presente investigación (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012).



El interés sostenido en comprender la importancia de los materiales de cambio fase llevó a investigar el diseño del elemento constructivo con los PCM incorporados para reducir la demanda energética de la vivienda en estudio y contribuir a mejoras de condiciones de habitualidad. Aquí, se utilizó la herramienta simulación Energy Plus para evaluar el rendimiento térmico de una vivienda en estudio ubicada en la ciudad de Concepción de la región del Bío-Bío, Chile.

En este estudio, se demostró que es posible maximizar la eficiencia del ahorro de energía en sistemas activos de climatización al optimizar el PCM aplicado a las paredes exteriores. Se identificó que los materiales de cambio de fase son una contribución a la implementación del acondicionamiento pasivo debido a su gran almacenamiento energético.





CAPITULO I: ENUNCIADO DE LA INVESTIGACIÓN



1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad las necesidades energéticas a nivel mundial han aumentado de manera significativa por distintas razones. Hoy en día, los edificios consumen más del 40% de la energía primaria del mundo, que son responsables del 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Thorpe, 2011).

A nivel local, el sector residencial es responsable de las altas demandas energéticas, equivalente a 23% del consumo energético nivel país. Del parque habitacional existente en Chile, 75% fue construido sin consideraciones térmicas y de eficiencia energética, dicha situación provoca que el usuario asuma el costo del consumo energético para mantener la vivienda en zona confort (Wegertseder, 2015).

Se estima que el sector de la construcción es el responsable de generar el 33% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (MINVU, 2018).

A través de un estudio realizado el año 2019 por la Cámara Chilena de la Construcción, sobre los usos de la energía en el sector residencial, declara que el 53% del consumo total de la vivienda chilena es destinado a calefacción (CDT, 2019).

Una forma eficiente de reducir el consumo de energía para calefacción o refrigeración en los espacios es aumentar la inercia térmica de un edificio. De esta manera, las temperaturas interiores son menos sensibles a las variaciones de la temperatura exterior y se requiere menos energía para mantenerlas en el rango de confort térmico. Un edificio con una estructura de marco de concreto tendrá una mayor inercia térmica que un edificio con una estructura de marco de acero o madera (Soares. N.. Costa. J. J.. Gaspar. A. R.. & Santos. P, 2013). Una forma de aumentar la inercia térmica de un edificio es utilizar el almacenamiento de calor latente (LHS), que es la energía que almacena un material cuando sufre un cambio de fase (Akeiber. H.. Nejat. P.. Majid. M. Z. A.. Wahid. M. A.. Jomehzadeh. F.. Zeynali Famileh. I.Zaki. S. A, 2016).



El material de cambio de fase (PCM) es un tipo de material que experimenta un cambio de fase, en este caso de líquido a sólido, a una temperatura dentro del rango de confort térmico. Este tipo de material tiene la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía en comparación con los materiales de construcción tradicionales que solo almacenan calor sensible. Por ejemplo, una pared que contiene PCM con 25 mm de espesor almacena aproximadamente la misma energía que una pared de concreto con 420 mm de espesor (Al-Saadi. S. N.. & Zhai. Z., 2013). Los PCM tienen un gran potencial para aumentar la inercia térmica de un edificio debido a su gran LHS, por lo tanto, son especialmente útiles en edificios de construcción livianas en seco, como estructuras reticulares en madera o acero galvanizados (Marin. P.. Saffari. M.. de Gracia. A.. Zhu. X.. Farid. M. M.. Cabeza. L. F.. & Ushak. S., 2016). Esto permite que el edificio tenga menor peso, un área útil mayor y aún mantenga una alta inercia térmica.

Cuando los PCM cambian su estado de líquido a sólido, liberan calor latente y cuando cambian de sólido a líquido absorben calor latente. Cuando este proceso ocurre a una temperatura entre 19-27 °C, el material contribuye a aumentar el confort térmico porque ayuda a mantener la temperatura interna dentro de este rango. Durante el día, cuando hay demasiadas ganancias de radiación solar, este material cambia su fase de sólido a líquido, absorbiendo calor y evitando un aumento significativo de la temperatura interior. Por la noche, cuando la temperatura exterior baja, el material cambia su fase de líquido a sólido, liberando calor y evitando una gran disipación de energía en el interior de la vivienda (Jamil. H.. Alam. M.. Sanjayan. J.. & Wilson. J., 2017).

Durante el verano, puede ocurrir un sobrecalentamiento en el muro y hacer que se use un PCM que se derrita a altas temperaturas (alrededor de 26 °C), ya que evitará que la temperatura de una habitación elevándose por encima del rango de confort térmico. Si el objetivo es la estabilización de la temperatura interior en la zona de confort, un PCM que se derrita a 23 °C debería



ser la mejor opción. En el invierno, puede ser necesario evitar que la temperatura de una habitación baje por debajo del rango de confort térmico, y en este caso se recomienda un PCM que solidifique alrededor de 21 °C (Soares. N.. Gaspar. A. R.. Santos. P.. & Costa. J., 2014).

Esta tecnología no solo tiene el potencial de ahorrar cantidades considerables de energía y emisiones de CO₂, sino que también se puede utilizar para aprovechar los precios pico de electricidad utilizando las unidades de aire acondicionado cuando hay una menor demanda en la red eléctrica. Por ejemplo, en invierno, la unidad de aire acondicionado (AC) podría funcionar durante la noche, produciendo calor que sería absorbido por el tablero PCM y luego liberado por él durante el día cuando los precios de la electricidad son mucho más altos (Devaux. P. & Farid. M., 2017). Esto también como la ventaja de evitar el ruido y las corrientes de aire causadas por las unidades de CA durante las horas de trabajo de una oficina.

Aunque esta tecnología tiene un gran potencial en almacenar energía con respecto a otros materiales, existe el problema de la baja transferencia de calor porque estos materiales generalmente tienen baja conductividad térmica, lo que hace que la absorción y liberación de calor por parte del PCM sea mucho más difícil (Fan. L. & Khodadadi. J. M., 2011).

Para aprovechar la gran capacidad de almacenamiento de calor latente, la temperatura de una zona debe estar cerca de la temperatura de cambio de fase, de lo contrario, un PCM solo almacena calor sensible, que es insignificante en comparación al calor latente (Chwieduk, 2013).

Investigadores concluyen sobre acondicionamiento térmico en envolventes de viviendas utilizando materiales de cambio de fase que la implementación adecuada de los PCM en una edificación puede un 35% reducir el consumo energético, y por lo tanto es posible usar equipos de acondicionamiento térmico de menor potencia e incluso prescindir de ellos (Bello, R. E. Muñoz, M. M. Vasco, C., 2015).



En el desarrollo de aplicaciones para los PCM, un investigador diseñó un muro con material de cambio de fase, y para probar su funcionamiento utilizó dos habitaciones idénticas. En la primera habitación los muros tenían un enlucido de yeso normal y en la segunda habitación el muro poseía una placa de yeso revestido con micro encapsulación de PCM (50% butil estearato y 48% palmitato de butilo). Resultó que la habitación con material cambio de fase una reducción energética de 22% (Scalat S., Banu D., Hawes D., Paris J., Haghghata F., Feldman D., 1996).

Los investigadores, a nivel mundial, han creado estrategias para solucionar el consumo energético. En Chile aún no se analiza en forma sistemática, considerando que sería de gran ayuda para disminuir el consumo energético residencial.

Por todo lo anteriormente mencionado, se establece que esta investigación estará orientada al estudio de materiales con cambio de fase, simulando su comportamiento térmico de una vivienda en estudio ubicada en la ciudad de Concepción de la región del Bío-Bío utilizando el software Energy Plus.

1.2 Preguntas de investigación

- ¿Es posible disminuir la demanda energética de una vivienda en estudio incorporando materiales con cambio de fase?
- ¿Qué material PCM es conveniente utilizar en los muros de la vivienda en estudio?
- ¿Qué comportamiento tendrán los PCM en la simulación?

1.3 Hipótesis

Se puede mejorar la habitabilidad y reducir un 30% la demanda energética de una vivienda en estudio en la ciudad de Concepción mejorando el almacenamiento térmico de sus muros incorporando material con cambio de fase (PCM).



1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Proponer una metodología de evaluación en función de la realidad local, que permitirá analizar la potencialidad en aplicar los materiales cambio de fase en las construcciones chilenas, contribuyendo a mejorar las condiciones de habitabilidad.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar materiales con cambio de fase (PCM) utilizados como estrategia de calefacción pasiva en edificación. Con la validación de todos los reglamentos en Chile.
- Definir el sistema constructivo del muro exterior en cuanto a la ubicación del PCM.
- Definir materiales con cambio de fase en relación de sus propiedades térmicas para realizar simulación energética.
- Definir metodología de cálculo y estimar ahorros energéticos para la zona en función del material base.
- Obtener simulaciones de demanda energética para la vivienda en estudio con y sin materiales de cambio de fase incorporados en sus muros mediante el software Energy Plus.
- Optimizar el diseño de la solución constructiva con PCM en relación a los datos de la zonificación.



CAPITULO II: MARCO TEÓRICO



2.1 Marco Teórico

A continuación, se nombrará conceptos esenciales que aborda la investigación tales como: aislación térmica, conductividad térmica, confort térmico y Inercia térmica.

Cabe de destacar que la inercia térmica juega un papel importante en los sistemas de calefacción pasiva, ya que el retraso térmico puede ser mayor o menor dependiendo el espesor y materialidad.

La inercia térmica permite ir liberando el calor acumulado en los elementos compuestos por materiales pesados en la vivienda, de manera tal que, durante la noche cuando la temperatura desciende, esta baja sea amortiguada por el calor cedido.

En el verano la envolvente se encuentra expuesta a la radiación solar y al soleamiento, por lo tanto, debe ser capaz de almacenar el calor obtenido desde el exterior, y así evitar que la temperatura en el interior del recinto sea elevada durante el día, generando una pérdida de confort (CCHC, 2010).

2.2. Materiales con cambio de fase (PCM)

Un PCM es una sustancia capaz de almacenar y liberar energía del medio que le rodea manteniendo la temperatura constante durante la transferencia de calor. Este intercambio de energía se denomina calor latente de un material y se produce durante el cambio de fase del mismo. El interés de estos materiales es que, durante el cambio de fase, la temperatura media se mantiene constante mientras el material absorbe o libera energía, durante la etapa de fusión o solidificación del material. Esto supone una mayor densidad energética en este proceso respecto a un intercambio por calor sensible.

En una investigación sobre PCM afirma que estos mediante su calor latente de fusión almacenan de 5 a 14 veces más calor por unidad de volumen que materiales por almacenamiento de calor sensible como el agua, albañilería o rocas, entre otras. (Sharma, 2009)

Para la investigación se estudió materiales cambio fase de estado líquido-sólido ya que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que entre otros cambios de estado (sólido-gas), la variación de volumen del estado es menor.

2.2.1. Funcionamiento

La mejor forma para explicar el funcionamiento de estos materiales, es estudiando el proceso de cambio de fase del agua: en estado líquido, el agua va aumentando su temperatura progresivamente hasta alcanzar los 100°C. Una vez alcanza esta temperatura, empieza su cambio de estado en el cual absorberá calor, pero mantendrá una temperatura constante de 100°C hasta que finalice su cambio de fase y todo el líquido se haya convertido en vapor. De manera inversa ocurre cuando la temperatura del agua disminuye hasta alcanzar los 0°C. En este caso, el agua empezará a liberar calor y durante este proceso, mantendrá su temperatura constante en 0°C hasta que complete su solidificación y todo el líquido se haya convertido en hielo. (B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling, 2003)

En la Figura 2.1, se observa cómo la temperatura se mantiene constante en 0°C formando una recta horizontal durante su cambio de fase y posteriormente en 100°C hasta que se convierte en vapor.

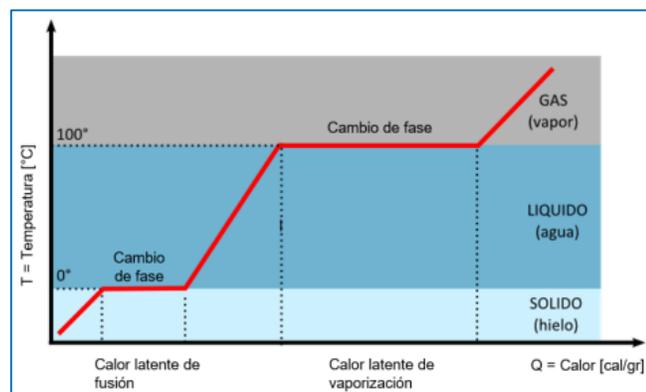


Figura 2.1: Diagrama de proceso de cambio de fase Hielo – Vapor.

Fuente: (B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling, 2003)



Del mismo modo actúan los PCM, cada uno tiene su propia temperatura de cambio de fase y, gracias a las variaciones de temperatura entre el día y la noche, ocurren los ciclos de fusión y solidificación de estos materiales, resultando en la absorción máxima de energía durante el día, cuando las temperaturas suben; y la disipación de ésta en la noche, cuando la temperatura ambiente baja. La energía utilizada para cambiar el estado del material, dado que la temperatura de cambio de fase es aproximada a la temperatura ambiente de confort deseada, dará lugar a un clima interior más estable y cómodo, así como también, reducirá las cargas de enfriamiento y calefacción en horas pico; especialmente en aquellas edificaciones con baja masa térmica. (S. E. Kalnaes and B. P. Jelle, 2015)

2.2.2. Propiedades

A continuación, se describirán las propiedades más relevantes que definen un material de cambio de fase (Oró, 2012):

a) Propiedades Termofísica

- Temperatura de fusión (T_f) en el rango de funcionamiento según la aplicación.
- Alto calor latente de fusión (ΔH_f) por unidad de volumen.
- Alto calor específico para proporcionar calor sensible adicional significativo.
- Alta conductividad térmica en fase sólida y líquida (buena transferencia de calor).
- Baja variación de volumen en el cambio de fase y baja presión de vapor a la temperatura de funcionamiento.
- Fusión congruente del material de cambio de fase con cada ciclo de solidificación/fusión, con el mínimo sub-enfriamiento.
- Cambio de fase ciclo continuo con termino de vida útil.
- Alta densidad.

**b) Propiedades químicas**

- Ciclo de solidificación/fusión reversible y completo.
- Baja degradación después de un elevado número de ciclos de fusión/solidificación.
- No corrosivo para los materiales encapsulados.
- No tóxico, no inflamable y no explosivo.

c) Económicas

- Abundante y disponible.
- Rentable en relación al ahorro energético y costos del material.
- Fácil reciclaje y tratamiento químicos.

2.2.3. Almacenamiento de energía térmica

La necesidad de almacenamiento energético y de buscar formas de acondicionamiento pasivo es lo que inspira a la investigación a centrarse en el almacenamiento térmico. Es fundamental para el desarrollo del país disminuir la demanda energética sin sacrificar el confort. (PRIEN., 2002).

En esta sección de la investigación se dará a conocer las formas de almacenamiento térmico existentes y dando énfasis al almacenamiento energético por calor latente donde pertenecen los materiales de cambio fase (PCM).

El equilibrio termodinámico de los PCM se debe principalmente a los intercambios de calor con el entorno externo. El tiempo para que el PCM alcance el nuevo equilibrio termodinámico es el tiempo necesario para que el calor sea intercambiado con el espacio a climatizar. Los parámetros básicos de los materiales de cambio de fase incluyen según ecuación (1):

- Capacidad calorífica, [J / kg]

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} C_{p,s} dt + C_m + \int_{T_m}^{T_2} C_{p,l} dt \cong C_{p,s}(T_m - T_1) + C_m + C_{p,l}(T_2 - T_1) \quad \text{Ec. 1}$$



Donde: $C_{p,s}$ o $C_{p,l}$: Calor específico sólido y líquido, $\text{kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$; C_m : Calor de transformación de fase (fusión), $\text{kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$; T_m - temperatura de transición de fase (fusión); T_1, T_2 : rango de temperatura de funcionamiento de operación.

2.2.4. Clasificación

Actualmente existe un gran número de materiales cambio fase que han sido investigados, debido a que poseen una temperatura y un alto calor latente de fusión dentro del rango operacional deseado, sin embargo, exceptuando por esta característica, la mayoría de estos materiales, no satisfacen los otros criterios necesarios para un medio de almacenamiento adecuado. (Sharma, 2009)

Aquellos que sí responden a estas prestaciones y se encuentran disponibles en el mercado, pueden ser clasificados en tres grandes grupos: orgánicos, inorgánicos y eutécticos. (V. Tyagi & D. Buddhi, 2007)

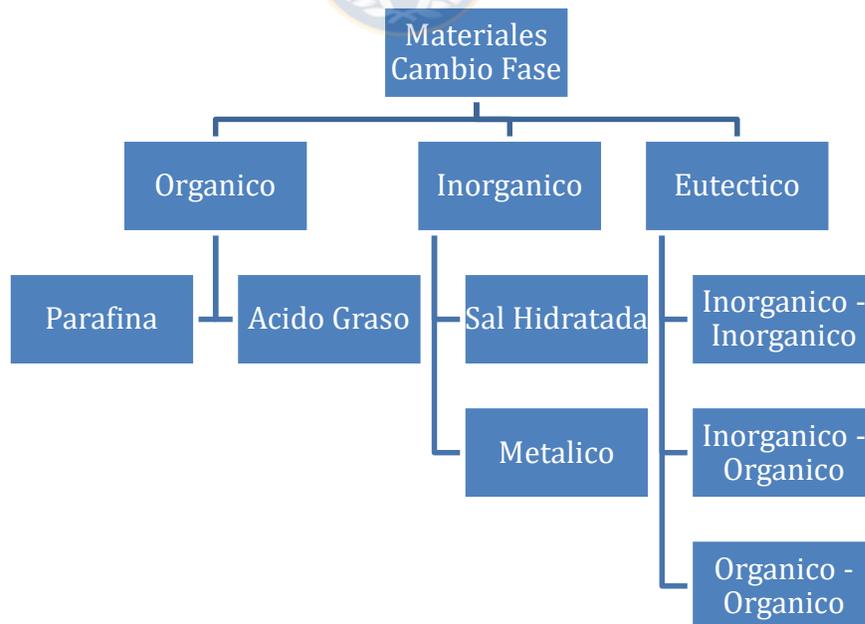


Figura 2.2: Clasificación de los Materiales Cambio Fase

Fuente: Elaboración Propia



Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes están en el rango de temperaturas entre 20°C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

Las ceras de parafina están disponibles en el mercado, pero su calor latente (hasta 200 kJ/kg.) es solo la mitad del de las sales hidratadas.

Las sales hidratadas son más económicas que las ceras de parafina y también están disponibles en el mercado, pero tienen algunas desventajas como las bajas temperaturas de fusión o la corrosión en contacto con metales.

En las mezclas eutécticas intervienen dos componentes con punto de fusión (solidificación) más bajo que el que poseen los compuestos individualmente. Esto hace que la mezcla alcance el punto de congelación más bajo posible y ambos se solidifiquen a esa temperatura eutéctica. (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

Los PCM tienen una significativa capacidad de almacenar calor por medio del cambio de estado, pero es necesario tener en cuenta los parámetros de diseño del problema y las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de materiales, para determinar cuáles son los más apropiados de utilizar en la construcción, dependiendo de sus diferentes características y más importante aun dependiendo de si su temperatura de cambio de fase se acerca a la temperatura de confort.

2.2.4.1 PCM inorgánicos: sales hidratadas

Según varios investigadores estos materiales fueron muy estudiados en las primeras etapas de investigación de PCM, por su bajo costo y su capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de calor por unidad de volumen, en comparación con las sustancias orgánicas, que las convierten en candidatos idóneos para sus múltiples aplicaciones en el ámbito del almacenamiento de energía.



La búsqueda de sustancias con temperatura de cambio de fase próxima a la temperatura ambiente no ha encontrado buenos candidatos dentro de este grupo y las investigaciones se han dirigido más hacia las sustancias orgánicas.

Tabla 2.1: Ventajas e inconvenientes de los PCM inorgánicos.

Ventajas	Inconvenientes
Económicos	Problemas en el encapsulado y preparación del material.
Elevada densidad de almacenamiento térmico.	Para un uso prolongado necesita de aditivos
Elevada conductividad térmica	Son susceptibles de sub enfriamiento (Inestables)
Temperatura de cambio de fase claramente definida	Debido a la inestabilidad térmica y histéresis, se debe aplicar aditivos para evitar una fusión incongruente en su aplicación, donde puede reducir su capacidad de almacenamiento de calor latente.
No inflamables	Potencialmente corrosivos con algunos metales
Reciclables y biodegradables	

Fuente: (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

Las sales hidratadas tienen algunas propiedades atractivas como los elevados valores de calor latente, no son inflamables y su elevado contenido hídrico significa que son baratos y muy disponibles. Sin embargo, sus características de inadaptación (corrosión, inestabilidad, dificultades de re-solidificación y tendencia al sub enfriamiento) han implicado la realización de estudios hasta la actualidad para poder manejar estas desventajas y realizar su correcta aplicación. Necesitan por tanto un contenedor, para utilizarlos como aditivos de otros materiales (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012).



Tabla 2.2: Temperatura de fusión de algunas sales hidratadas.

PCM	Temperatura. fusión (°C)	Q fusión (kJ/kg)
KF·4H ₂ O	18,5	231
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32,4	254
CaCl ₂ ·6H ₂ O	24–29	192
CaCl ₂ ·6H ₂ O+Nucleador+MgCl ₂ ·6H ₂ O	23	-

Fuente: (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

En la tabla 2.1 se muestran algunas ventajas y desventajas de los PCM inorgánicos y en la tabla 2.2 se muestran las temperaturas de fusión de las sales hidratadas que permiten determinar cuáles son las óptimas para utilizar en aislación (las cuales su temperatura de fusión se acerca a la temperatura de confort).

2.2.4.2 PCM orgánicos: parafinas, ácidos grasos y mezclas orgánicas

Los PCM orgánicos poseen unas características que los hacen muy útiles en su aplicación en determinados elementos constructivos para almacenamiento de calor latente.

Investigadores determinaron que son más estables químicamente que las sustancias inorgánicas, funden y solidifican convenientemente, sin necesidad de agentes nucleadores y no sufren sub-enfriamiento o histéresis (Gawron, 1981). No obstante, se ha demostrado que son más compatibles y adecuados para la adsorción en varios materiales constructivos. Aunque el costo inicial en materia prima de un PCM orgánico es superior al de un inorgánico, su costo final es competitivo.

Sin embargo, estos materiales tienen otras desventajas, la más significativa es que son inflamables y que emiten gases nocivos durante su combustión. Otros problemas, menos extendidos, son las reacciones con los



productos de la hidratación en hormigón (hidróxido de calcio), envejecimiento por oxidación y cambios de olor.

Muchos de estos inconvenientes se han eliminado. Se ha visto que el envejecimiento por oxidación de los PCM puede inhibirse utilizando un oxidante adecuado. Se está investigando también en la emisión de gases y la inflamabilidad de algunos de los PCM más efectivos, para establecer un radio de ignición. También se está investigando sobre la compatibilidad de los PCM con el hormigón. (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

En la tabla 2.3 se muestran algunas ventajas y desventajas de los PCM orgánicos y en la tabla 2.4 y 2.5 se muestran las temperaturas de fusión de las parafinas y ácidos grasos, que permiten determinar cuáles son las óptimas para utilizar en aislación (las cuales su temperatura de fusión se acerca a la temperatura de confort).

Tabla 2.3: Ventajas e inconvenientes de los PCM orgánicos.

Ventajas	Inconvenientes
Fáciles de usar	Calor latente y entalpía más bajos
Estabilidad térmica y química	Baja conductividad térmica
No sufren subenfriamiento	Amplio rango de fusión
No necesitan agente nucleador para solidificar	Inflamables
No corrosivos	Reacción potencial con hormigón
Reciclables y ecológicamente inocuos	Alto costo
Compatibilidad con materiales de construcción convencionales	

Fuente: (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

Dentro de los PCM orgánicos se pueden encontrar tres grupos de sustancias diferentes: parafinas, ácidos grasos, y mezclas orgánicas. A continuación, se presenta una pequeña descripción de estos. (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)



2.2.4.2.1 Parafinas

Las parafinas son esencialmente un alcalino sólido refinado. Muestran dos rangos de enfriamiento: un rango más estrecho para un breve periodo de tiempo, y un rango más extenso que ocurre durante un periodo más amplio. Ambos se interpretan como una transición de líquido a amorfo-sólida y amorfo-sólida a cristalino-sólida, respectivamente. Parte del calor latente total de fusión se almacena en la sustancia durante cada una de estas transiciones.

Tabla 2.4: Temperatura de fusión de algunas parafinas.

PCM	Temperatura fusión (°C)	Q fusión (kJ/kg)
Hexadecano	18	236
Heptadecano	22	214
Octadecano	28	244
Parafina	20–60	200
RT25	25	147

Fuente: (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

2.2.4.2.2 Ácidos Grasos

Los ácidos grasos, derivados de productos animales y vegetales, están constituidos por una larga cadena alifática, más de 12 carbonos. Su cadena alquílica puede ser saturada o insaturada.

En general, muestran excelentes características térmicas (punto de fusión y congelación). El rango de temperatura de refrigeración es grande, y no se produce sub enfriamiento, aunque en algunos casos se han detectado. Estos materiales, sin embargo, tienen elevado costo, pudiéndose utilizar en dispositivos especiales de almacenamiento de calor o frío.



Tabla 2.5: Temperatura de fusión de algunos ácidos grasos

PCM	Temperatura fusión (°C)	Q fusión (kJ/kg)
Cáprico	31,5	158
Láurico	42-44	179
Pentadecano	52	159
Mirístico	54	190
Palmítico	63	183
Esteárico	70	196
Eritrol	116-118	126

Fuente: (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

2.2.4.3 Mezclas eutécticas

También existen las mezclas eutécticas, que puede ser la mezcla de 2 PCM orgánicos, de 2 PCM inorgánicos o de un PCM Orgánico más un PCM inorgánico. A continuación, en la tabla 2.6 se muestra la clasificación de los PCM.

Tabla 2.6: Clasificación de los PCMs.

Tipo PCM	Composición
Orgánicos	Compuestos de parafina
	Compuestos sin parafina
Inorgánicos	Sales hidratadas
	Metálicos
Eutécticos	Orgánico-Orgánico
	Orgánico-Inorgánico
	Inorgánico-Inorgánico

Fuente: (Juarez,D., Balart. R., Ferrandiz, S. & Garcia, D., 2012)



2.3 Criterios de selección de los Materiales con Cambio se Fase

Es muy importante la correcta selección del material de cambio de fase dependiendo del campo en que se desee utilizar, por lo que a continuación se presentaran algunos criterios para seleccionar un PCM correctamente. Estos criterios son propuestos según una investigación realizada en España. (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

a) Físicas

- La densidad del líquido y del sólido deben ser similares, y preferiblemente elevadas, para poder almacenar mayor cantidad de calor por unidad de volumen.
- Variación de volumen (en el cambio de fase) bajo.

b) Cinéticas

- Evitar el problema de histéresis, subenfriamiento o retardo al inicio de la solidificación, como ocurre en los PCM inorgánicos, que se produce al no ceder el calor latente de un PCM pese a que su temperatura sea inferior al punto de congelación.

c) Químicas

- El proceso de cambio de fase debe ser totalmente reversible y solo dependiente de la temperatura.
- Ser químicamente estables en el tiempo evitando su descomposición y contaminación.
- No presentar segregación de fases.
- Ser compatibles con los materiales de encapsulado y otros con los que esté en contacto: estabilidad química, para evitar oxidación, descomposición térmica, hidrólisis, corrosión y otras reacciones.
- No inflamables y resistentes al fuego.

d) Térmicas

- La temperatura de cambio de fase debe ser adecuada a cada aplicación particular.



- Presentar una temperatura de fusión definida o, al menos, el cambio de fase debe producirse en un valor discreto o en un pequeño intervalo de temperaturas.
- Poseer una gran capacidad de almacenamiento de calor sensible (calor específico) en estado sólido y líquido y elevada entalpía de cambio de fase, calor latente.
- Poseer una alta conductividad térmica para facilitar la transferencia de calor.

e) Económicas

- Estar disponible en grandes cantidades a bajo costo, para que sean viables técnica y económicamente.
- Tener un razonable ciclo de vida útil de acuerdo con su costo.

2.4 Vida útil del material cambio fase.

El tiempo de vida útil de un PCM viene determinado por la cantidad de ciclos térmicos que es capaz de soportar un material manteniendo su estabilidad térmica. El PCM es sometido a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento en los que el material cambia de fase de sólido a líquido y posteriormente vuelve a cambiar de fase de líquido a sólido. Se miden sus propiedades térmicas en temperaturas fusión y entalpías, obteniendo el número de ciclos en los que las propiedades térmicas del material no varían de forma considerable.

Tras realizar una exhaustiva búsqueda, existe muy poca bibliografía acerca de la degradación térmica de los PCM y la determinación de su tiempo de uso, especialmente en aplicaciones para edificación donde la vida útil del material debe ser elevada.

Aunque es complicado conocer la vida útil real de estos materiales y en qué momento dejan de conservar sus propiedades adecuadas para las aplicaciones a las que se destina, existen algunos artículos basados en experimentos realizados en laboratorios de materiales sometidos a ciclos térmicos acelerados, para determinar si en un número de ciclos, el material mantiene sus propiedades térmicas intactas (temperaturas fusión y entalpías).



Algunos materiales son sometidos a 50, 100, 1000 o hasta 5000 ciclos térmicos. Pero el problema es determinar si ese máximo de 5000 ciclos es suficiente para asegurar que un material seguirá cumpliendo su función. Hasta el momento no se ha encontrado en la literatura ninguna investigación donde se ensaye el material un número suficiente de ciclos hasta la pérdida de sus propiedades térmicas para poder conocer su vida útil o el número de ciclos que es capaz de soportar el PCM hasta su degradación.

Por todo lo anteriormente expuesto, en esta investigación se ha considerado la vida útil del material como el mayor número de ciclos soportados por un material obtenidos a partir de los estudios realizados por diferentes autores en la literatura o fabricante, a pesar de no haber llegado a degradarse en su totalidad.

2.5 Aplicación en la construcción

El sector de la construcción es el que más beneficios puede obtener de la utilización de materiales con cambio de fase (PCM) ya que tiene importantes beneficios en ahorro energético, reducir la contaminación de CO₂ y optimizar la inercia térmica en las edificaciones, con el objetivo de mejorar la habitabilidad de los usuarios.

La temperatura interior en un edificio depende de las condiciones exteriores, interiores y de las características térmicas de la edificación, como la capacidad térmica de los materiales, que tiene un efecto como el mostrado en la figura 2.3, el cual no considera un sistema activo en su análisis.

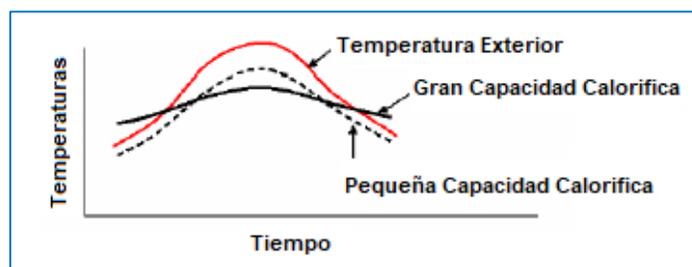


Figura 2.3: Estabilización de la temperatura interior por el efecto inercia térmica

Fuente: (M. Kenisarin & K. Mahkamov, 2007)

Actualmente la mayoría de los materiales de construcción son livianos, lo que trae como consecuencia una baja capacidad calorífica. La introducción de materiales de cambio de fase puede aumentar la inercia térmica del edificio, sin aumentar mucho su peso. Sin embargo, es necesario disponer de área de transferencia de calor suficiente para liberar esa energía (Dincer I. & Rosen M., 2002) y es imprescindible que se pueda descargar el material por medio de la ventilación durante la noche para prevenir el sobrecalentamiento en los elementos con PCM (M. Kenisarin & K. Mahkamov, 2007).

La Figura 2.4 muestra una comparación entre el espesor de material requerido para obtener la misma capacidad térmica que la obtenida con un centímetro de PCM:

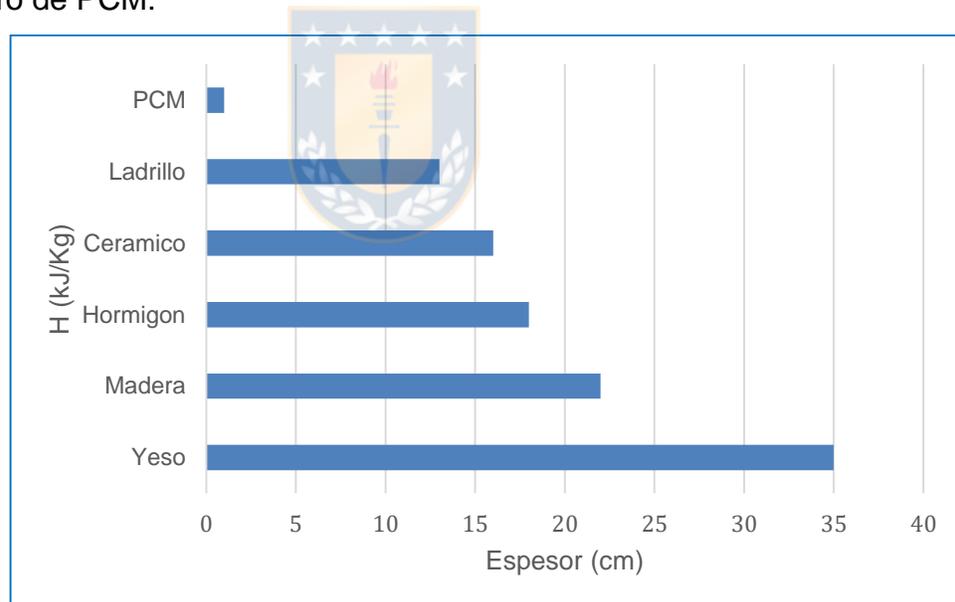


Figura 2.4: Espesor requerido de distintos materiales Vs Energía térmica

Fuente: (M. Kenisarin & K. Mahkamov, 2007).

Las características requeridas para el empleo de materiales de cambio de fase en la edificación son:



- Temperatura de cambio de fase entre 12 y 25°C
- Alta estabilidad a los ciclos de cambio de fases debido a la larga vida útil de los edificios.
- No corrosivos para reducir el riesgo de fuga de su contenedor y evitar daños en la estructura del edificio.
- Considerar la inflamabilidad al fuego y dar soluciones constructivas de acuerdo a la normativa.
- Económicamente viable en función de los costos de implementación y ahorro energéticos.

Una limitación de los PCM para su aplicación en la construcción es la estacionalidad, pues el PCM debe ser seleccionado para aplicaciones en calefacción pasiva. Esta limitación reduce los beneficios térmicos, el ahorro energético y su viabilidad económica. Investigadores estudiaron un concepto de doble capa de PCM para que funcionara durante todo el año. (A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj & R.V. Seeniraj, 2008)

2.6 Encapsulación

Uno de los criterios que ha limitado el uso generalizado de los PCM, es la incompatibilidad entre estos materiales y sus contenedores, afectando su estabilidad a largo plazo, degradado sus propiedades y provocando la corrosión de sus recipientes de embalaje. Como respuesta a estos inconvenientes, han surgido diferentes técnicas de encapsulación de los PCM, las cuales ofrecen unas ventajas significativas, tales como:

- Aumento del área de transferencia de calor.
- Reducción de la reactividad hacia el ambiente exterior.
- Control de los cambios en el volumen, éstos ocurren dentro de la capsula.
- No hay absorción de humedad.

Los métodos de encapsulación, clasificados de acuerdo a su tamaño, pueden ser de dos tipos: micro y macro encapsulados. (Lane, 1986)

2.6.1 Microcápsulas

Una investigación menciona que la micro encapsulación podría definirse como el proceso de rodear o envolver una sustancia en otra sustancia a escala muy reducida, produciendo cápsulas que van desde 1 μm a 1000 μm de diámetro. Los tres estados de la materia (sólidos, líquidos y gases) pueden ser micro encapsulado.

El material de la membrana exterior debe ser compatible con el PCM y, a su vez, ser capaz de hacer frente a la tensión mecánica sobre las paredes del recipiente, provocada por las variaciones de volumen durante el cambio de fase. (S. E. Kalnæs & B. P. Jelle, 2015)

Por lo general, los PCM micro-encapsulados se encuentran comercialmente disponibles en dos formatos: dispersión fluida, donde las cápsulas son dispersadas en agua o en polvo en mezclas en seco.

La figura 2.5 muestra en términos práctico la conformación de la envolvente de polímero en una cera PCM, dimensionando el tamaño en ellas.



Figura 2.5: Microcápsulas

Fuente: (S. E. Kalnaes and B. P. Jelle, 2015)

2.6.2 Macrocápsulas

La macro-encapsulación hace referencia a PCM encapsulados en cualquier tipo de recipiente, tal como tubos, esferas o paneles que pueden ser incorporados en materiales de construcción o que actúan como intercambiadores de calor por sí mismos. El tamaño de estos contenedores es por lo general más de 1 cm³, almacenando desde varios mililitros hasta varios litros. La tecnología de macro encapsulación emplea un proceso de encapsulación de doble capa, creando una cápsula con una configuración en forma de matriz. La principal ventaja de los envases plásticos es la disponibilidad en el mercado y la facilidad de producirlos en una gran variedad de formas y con pocas restricciones geométricas. Además, son compatibles con la mayoría de PCM, incluyendo las sales hidratadas, por lo general no presentan degradación, aunque algunos materiales orgánicos pueden llegar a suavizarlos. (S. E. Kalnaes and B. P. Jelle, 2015)

El PCM se encuentra confinado por la encapsulación evitará cambios volumétricos importantes, lo que evita varios riesgos y garantiza la integridad del componente en el que se insertan las cápsulas. La barrera polimérica puede ser de otros materiales, por ejemplo, como aluminio ya que, mejora la compatibilidad con otros materiales de construcción y evita la corrosión. Este tipo de aplicación es de fácil manejo, una clara ventaja de este proceso en relación a los métodos de impregnación e inmersión del ítem anterior.



Figura 2.6: Cápsulas de macro PCM (Contenedor plano, Esfera, Placas de barra doble y placas de aluminio).

Fuente: (S. E. Kalnæs & B. P. Jelle, 2015)



CAPITULO III: MÉTODOS Y METODOLOGÍA.



En este estudio, la evaluación se centra en el análisis de optimización de la aplicación PCM a los muros exteriores y dimensionamiento del rendimiento térmico de una vivienda en estudio

Los modelos generados en el software Energy Plus se ingresó valores de los sistemas constructivos de la vivienda en estudio, condiciones climáticas, caracterización PCM en muros exteriores y caracterización macro encapsulación, de acuerdo con las directrices (DOE, 2016) se explica en las siguientes secciones del capítulo.

3.1 Herramienta de simulación de energía

Para evaluar los PCM de comportamiento térmico variable de la vivienda en estudio con y sin PCM, se utilizó el software EnergyPlus v 8.7.

En términos generales, el software puede evaluar una variedad de cálculos destacados, como los cálculos de puentes térmicos, HVAC integrado y simulaciones de carga de construcción, confort térmico y materiales con conductividad térmica variable como el PCM (D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang & C.O. Pedersen, 2001). Además, hay muchas opciones para la convección de la superficie interior y exterior. algoritmos, infiltración avanzada e ventilación, energía desarrollada, costos del ciclo de vida, algoritmos avanzados de confort térmico como como la calidad del aire interior y el confort térmico para los ocupantes (D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert & B.T. Griffith, 2008).

Para analizar el comportamiento térmico variable de los PCM en estudio, se utilizó el algoritmo de diferencia finita de conducción (CondFD). Este algoritmo modela la transferencia de calor en presencia de PCM y junto con la ecuación (2) discretiza la envolvente del edificio en varios nodos para resolver numéricamente la transferencia de calor, en el software se puede escoger ecuaciones por un esquema totalmente implícito y el Crank-Nicolson, que es semi-implícito. (K.O. Lee, 2016).



En esta investigación, se utiliza un esquema Crank-Nicolson para simular PCM para un material homogéneo con espaciado uniforme de nodos como se muestra en la ecuación (2), (3) y (4), extraído del manual del software EnergyPlus. (DOE, 2016)

$$C_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \left(k_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_w \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) \quad \text{Ec. 2}$$

$$\Delta x = \sqrt{c \alpha \Delta t} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde C_p y ρ son el calor específico y la densidad del material; Δx es el espesor de capa de diferencia finita, Δt es el paso de tiempo; T es la temperatura de un nodo i ; $i + 1$ y $i - 1$ son los nodos adyacentes al interior y exterior, respectivamente, de una capa de material; j y $j + 1$ son los pasos de tiempo anterior y nuevo; k_w y k_E representan las conductividades térmicas, $k_w = \frac{k_{i+1}^{j+1} + k_i^{j+1}}{2}$ y $k_E = \frac{k_{i-1}^{j+1} + k_i^{j+1}}{2}$; α es la difusividad térmica del material y c es la constante de discretización del espacio que puede definir el usuario (3 es el valor predeterminado para esta constante según manual).

Esta investigación considera el uso de paneles PCM, por lo tanto, el algoritmo CondFD ecuación (2) debe combinarse con una función de temperatura de entalpía $h = h(T)$, estos datos en la función se obtendrán de acuerdo al estudio bibliográfico. El algoritmo usa esta función para actualizar el calor específico equivalente ($*C_p$) en cada paso de tiempo como se muestra en la ecuación (4).

$$*C_p(T) = \frac{h_i^j - h_i^{j-1}}{T_i^j - T_i^{j-1}} \quad \text{Ec. 4}$$



3.2 Descripción Vivienda en estudio

En este apartado, se define los sistemas constructivos de la vivienda en estudio con y sin PCM para obtener la línea base de comparación.

En la figura 3.1, se muestra el diseño de vivienda en estudio de 56 m² y los espacios interiores con su distribución de áreas véase en la tabla 3.1; esta vivienda se configuro de acuerdo a las soluciones constructivas acreditadas (MINVU, Soluciones constructivas acreditadas al fuego, térmico y acústico, 2020).

Las características de la envolvente de la vivienda en estudio cuentan con la configuración mínima de la reglamentación térmica que actualmente rige en Chile está establecida en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en su artículo 4.1.10 y en una zonificación del país en zonas térmicas según grados-día, especificados en el manual de aislamiento térmico (MINVU, Manual de aplicación y reglamentación térmica, 2017). Los complejos de techumbres, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, entendidos como elementos que constituyen la envolvente de la vivienda, deberán tener una transmitancia térmica “U”, igual o menor, o una resistencia térmica total “Rt”, igual o superior a la señalada para la zona que le corresponda al proyecto de arquitectura, de acuerdo con los planos de zonificación térmica corresponde a zona 4 y se verifica lo anteriormente expuesto en la tabla 3.2, cabe señalar que los valores de transmitancia térmica, se extrajeron de acuerdo a las ecuaciones de balance térmico que está incorporado en el software .

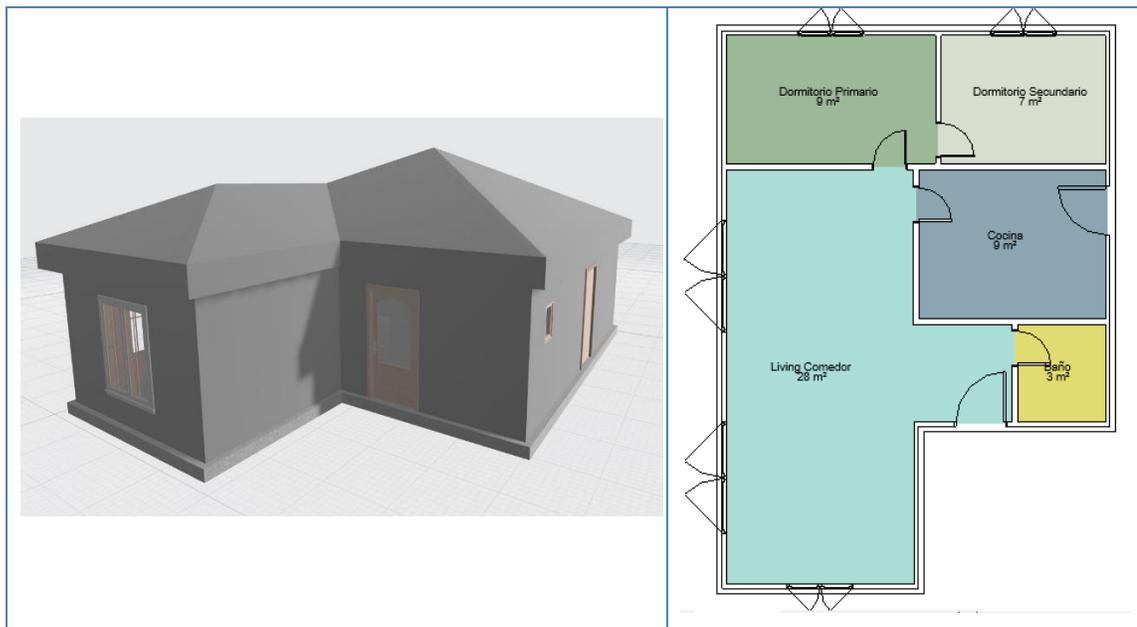


Figura 3.1: Descripción Vivienda en estudio
Elaboración Propia - Software Revit

A continuación, se muestra las dimensiones que tiene cada espacio de las dos torres del edificio en las siguientes tablas:

Tabla 3.1: Resumen superficies de los distintos espacios vivienda en estudio

Torre A		
Lugar	Superficie (m ²)	Altura (m)
Dormitorio Primario	8	2.4
Dormitorio Secundario	7	2.4
Cocina	9	2.4
Living - Comedor	28	2.4
Baño	3	2.4
TOTAL		56

Fuente: Elaboración Propia



Tabla 3.2: Cumplimiento de la envolvente elementos constructivos de la vivienda en estudio.

Elemento	Materiales (exterior al interior)	Espesor (m)	Transmitencia térmica Valor U (W/m2K)	Transmitencia térmica exigida Valor U (W/m2K)
Muro Exterior	Siding	0,006	0,672	1,7
	Fibrocemento			
	Plancha OSB	0,009		
	Entramado madera pino 2x3"	0,075		
	Lana de vidrio	0,05		
	Cámara no ventilada (Ubicación del PCM)	0,026		
Muro Interior	Placa yeso cartón	0,015	0,677	1,7
	Entramado madera pino 2x2"	0,075		
	Lana de vidrio	0,05		
	Placa yeso cartón	0,015		
Techumbre	Plancha Zinalum	0,035	0,316	0,38
	Fieltro	0,005		
	Plancha OSB	0,009		
	Entramado madera pino 2x2"	0,075		
	Lana de Vidrio	0,05		
	Placa yeso cartón	0,0125		
Piso en contacto con el terreno	Radier Hormigón	0,2	1,7	No aplica

Fuente: Elaboración Propia

Para integrar el PCM con la vivienda en estudio se configuró las propiedades técnicas y la ubicación óptima interna del PCM al panel externo constructivo donde se administró en el modelo de simulación, véase en la Figura 3.13 y figura 3.8.

3.2.1 Método de zona en software EnergyPlus

El modelo de construcción creado se utilizó el método de zona, donde todas las zonas fueron modeladas con información completa en construcción, ocupación, equipamiento y HVAC.

Al iniciar el modelo, se elige la ubicación y el tipo de análisis. Después, se debe ingresar un nombre al sitio y a cada zona. Además, se puede asignar varios edificios bajo el mismo sitio, cada uno con su propio nombre. Una vez definido lo anterior se genera bloque que generalmente representa un piso o nivel planta para este estudio se genera bloque de acuerdo a la figura 3.2.

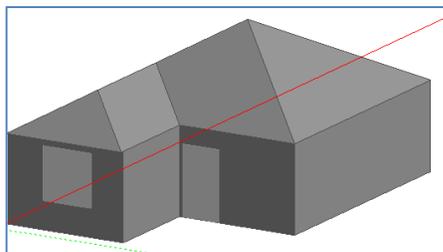


Figura 3.2: Modelo de zona en casa de estudio

Fuente: Elaboración Propia

La fase de zonificación separa las diferentes zonas térmicas. Para el modelo, cada suite se considera una zona. El método de zona permite asignar diferentes horarios operativos a cada zona. Cada una de las paredes de cada bloque se llama superficie y ventanas o puertas como sub-superficies o aberturas. La vivienda se muestra parcialmente en la Figura 3.3.

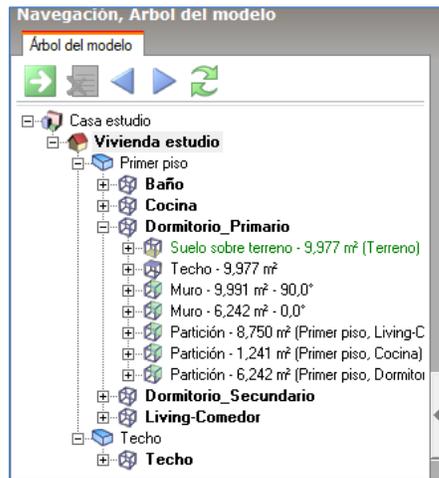


Figura 3.3: Zona y sub-superficie de vivienda en estudio

Fuente: Elaboración Propia

El software da la posibilidad de elegir los materiales utilizados en la construcción de la vivienda a través de sus bibliotecas de materiales o pueden ser creados por el usuario, y los materiales elegidos son asignado a las partes especificadas de la vivienda. Estos pasos se repitieron en todos los pisos para completar todo el modelo de construcción.

3.3. Datos meteorológicos

El modelo de simulación se mantuvo en base a los datos meteorológicos con formato EPW en Energy plus. se definió la ubicación Concepción, Chile. Con el objetivo de evaluar el rendimiento térmico y analizar la optimización de la posición del PCM al muro exterior de la vivienda en estudio. Las configuraciones de los datos meteorológicos se muestran en la Figura 3.4.



Casa estudio	
Modelo Datos del Sitio Datos de Región	
Plantilla de Sitio	
Plantilla	CONCEPCION
Ubicación	
Letitud (°)	-36,77
Longitud (°)	-73,07
Zona climática ASHRAE	3C
Detalles del Sitio	
Hora y Horario de Verano	
Zona horaria	(GMT-04:00) Santiago
<input checked="" type="checkbox"/> Aplicar horario de verano	
Inicio del Invierno	Apr
Final del Invierno	Sep
Inicio del verano	Oct
Final del verano	Mar
Datos Climáticos para Simulación	
Datos climáticos horarios	CHL_CONCEPCION_IWEC
Día de la semana para inicio	8-Usar archivo climático
Datos Climáticos para Diseño de Calefacción	
<input checked="" type="radio"/> Calefacción con nivel percentil de 99.6%	
Temperatura exterior de BS mínima (°C)	1,2
Velocidad del viento coincidente (m/s)	17,4
Dirección del viento coincidente (°)	0,0
<input type="radio"/> Calefacción con nivel percentil de 99.0%	
Datos Climáticos para Diseño de Refrigeración	

Figura 3.4: Configuración datos meteorológico.

Fuente: Elaboración Propia

3.4. Jornadas de ocupación

Para realizar la simulación energética, se deben definir una serie de planillas de ocupación de los recintos, uso de luminaria y equipos. En estas planillas de ocupación se define el ciclo horario para todos los días del año.

Esto se realiza con la finalidad de establecer los periodos en los que influyen los distintos tipos de cargas internas en la vivienda.

A continuación, se adjunta a modo de ejemplo la figura 3.5, en la cual se puede ver el menú de configuración de las plantillas de ocupación.



Schedules							
General							
General							
Name	Cocina						
Description							
Source	UK NCM						
Category	Residential spaces						
Region	General						
Schedule type	1-7/12 Schedule						
Design Days							
Design day definition method	1-End use defaults						
Use end-use default	2-Occupancy						
Profiles							
Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Feb	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Mar	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Apr	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
May	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Jun	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Jul	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Aug	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Sep	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Oct	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Nov	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...
Dec	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...	9:00 - 15:30 & 19:00 - ...

Figura 3.5: Planilla de uso horario de un recinto.

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Configuración envolvente por elemento y sistemas de climatización.

Definidos las zonas y multi zonas del modelo, se deberá configurar los sistemas constructivos en sus propiedades térmicas y dimensiones. El software automáticamente genera el cálculo de transmitancia térmica, análisis de condensación y dimensión en imagen por elemento. Véase en la figura 3.6.

Para configurar el sistema de climatización, primero se debe definir los rangos de temperatura confort térmico en la pestaña de actividades del software, Véase figura 3.7. A continuación se define el tipo de sistema de climatización, definiendo las horas de operación, tipo combustible y rendimiento del sistema, como se muestra en la figura 3.8

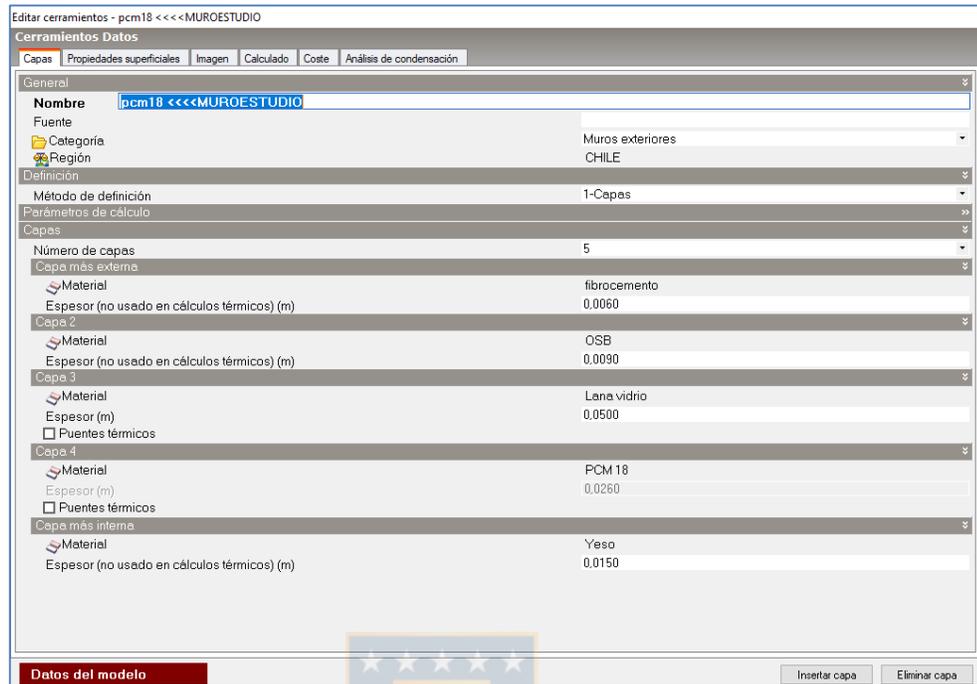


Figura 3.6: Planilla configuración envolvente por elemento.

Fuente: Elaboración propia.

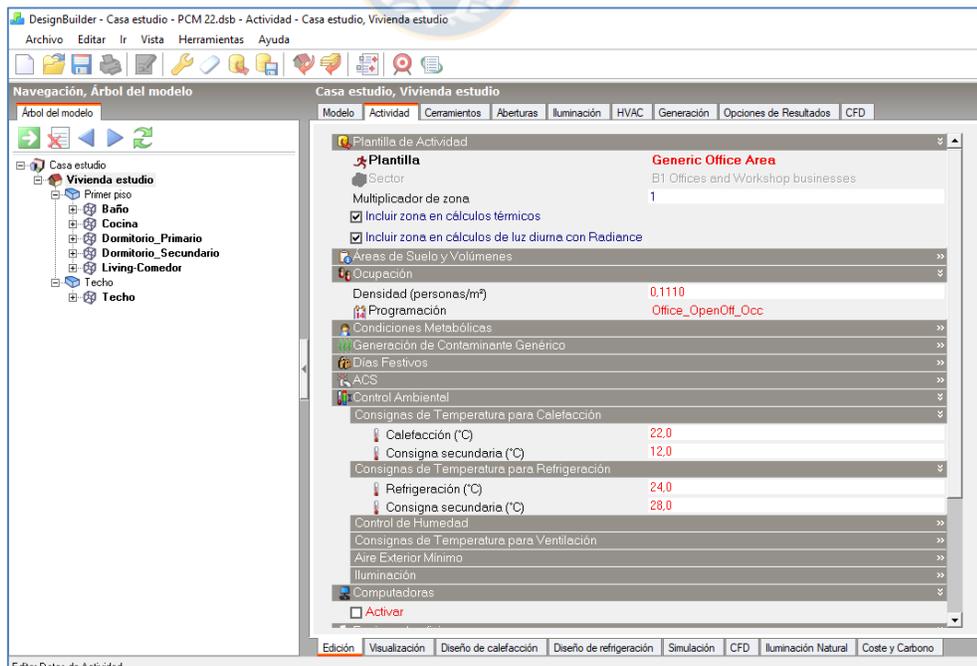


Figura 3.7: Planilla configuración rango de temperatura confort térmico.

Fuente: Elaboración propia.

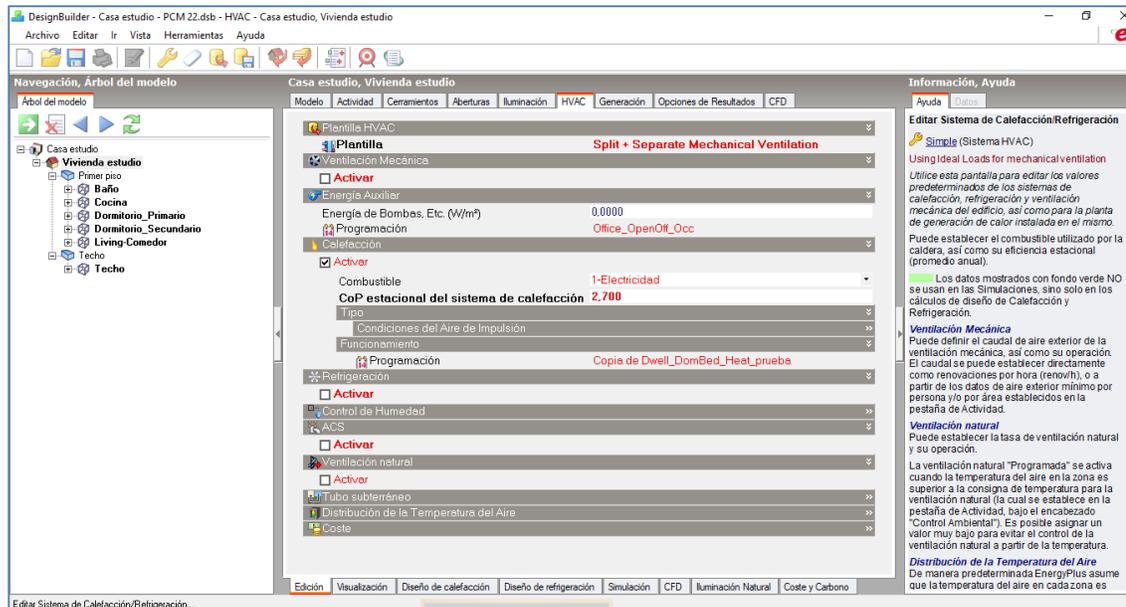


Figura 3.8: Planilla configuración del tipo de sistema de climatización.

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Caracterización PCM

En este estudio, se utilizó placas PCM tipo orgánico de parafina tiene una relación de mezcla de n-octadecano a n-heptadecano, seleccionado debido a la eficiencia energética con temperatura cercana al confort térmico (12–26 ° C) basado en ISO 13790 (K.O. Lee, 2016).

Según el estado de arte existente se definió los tres materiales de cambio de fase, los cuales son candidatos idóneos para utilizar en esta investigación. Estos materiales han sido estudiados por diversos autores con el fin de obtener sus propiedades termofísicas y usarlas en la edificación. La razón de utilizar estos materiales es debido a sus propiedades térmicas y el que su temperatura de fusión es cercana a la temperatura de confort.

Además, la vida útil del PCM es de 13 años, según su ciclo de cambio fase; considerando 365 cambios fase anual, el cual se justifica con los costos de



inversión al implementar esta tecnología, dependiendo de la magnitud del flujo de calor el cuál se quiere operar.

Las especificaciones técnicas de las placas PCM y el comportamiento de temperaturas y entalpias de operación se describen en la tabla 3.3, las cuales se vinculan con el algoritmo CondFD de la ecuación (2) para evaluar su rendimiento energético en la vivienda en estudio.

3.6.1 Selección de Materiales Cambio Fase.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de PCM a utilizar

Características RT18HC	Valores	Unidades	Grafica entalpia y Temperatura
Temperatura de Fusión	18	°C	
Almacenamiento de calor	260	[kJ/kg]	
Capacidad calor especifico	2	[kJ/kg·K]	
Densidad solido (a los 15°C)	0,88	[kg/l]	
Densidad solido (a los 25°C)	0,77	[kg/l]	
Conductividad térmica (Ambas fases)	0,2	[W/(m·K)]	
Expansión de Volumen	12,5	%	
Máxima temperatura operación	50	°C	
Ciclo Cambio fase	5000	-	
Características RT21HC	Valores	Unidades	
Temperatura de Fusión	21	°C	
Almacenamiento de calor	155	[kJ/kg]	



Capacidad calor específico	2	[kJ/kg·K]	<p>Entalpia Vs Temperatura - PCM 21HC</p>	
Densidad solido (a los 15°C)	0,88	[kg/l]		
Densidad solido (a los 25°C)	0,77	[kg/l]		
Conductividad térmica (Ambas fases)	0,2	[W/(m·K)]		
Expansión de Volumen	12	%		
Máxima temperatura operación	45	°C		
Ciclo Cambio fase	5000	-		
Características RT22HC	Valores	Unidades		Grafica entalpia y Temperatura
Temperatura de Fusión	22	°C		<p>Entalpia Vs Temperatura - PCM 22HC</p>
Almacenamiento de calor	190	[kJ/kg]		
Capacidad calor específico	2	[kJ/kg·K]		
Densidad solido (a los 15°C)	0,76	[kg/l]		
Densidad solido (a los 25°C)	0,70	[kg/l]		
Conductividad térmica (Ambas fases)	0,2	[W/(m·K)]		
Expansión de Volumen	12,5	%		
Máxima temperatura operación	50	°C		
Ciclo Cambio fase	5000	-		

Fuente: (Rubitherm, 2020)

3.6.2 Configuración del PCM en EnergyPlus.

De acuerdo al estudio bibliográfico de los materiales cambio fase, para ingresar los datos al software, se debe definir las cantidades de temperatura de operación, identificar el punto de fusión en las gráficas de entalpía y temperatura de la tabla 3.3, conductividad térmica, calor específico, densidades y espesor en el elemento constructivo, con el fin de determinar el flujo de calor de operación de acuerdo al balance termodinámico de la ecuación (2). A continuación, se adjunta a modo de ejemplo la figura 3.9, en la cual se puede ver el menú de configuración.

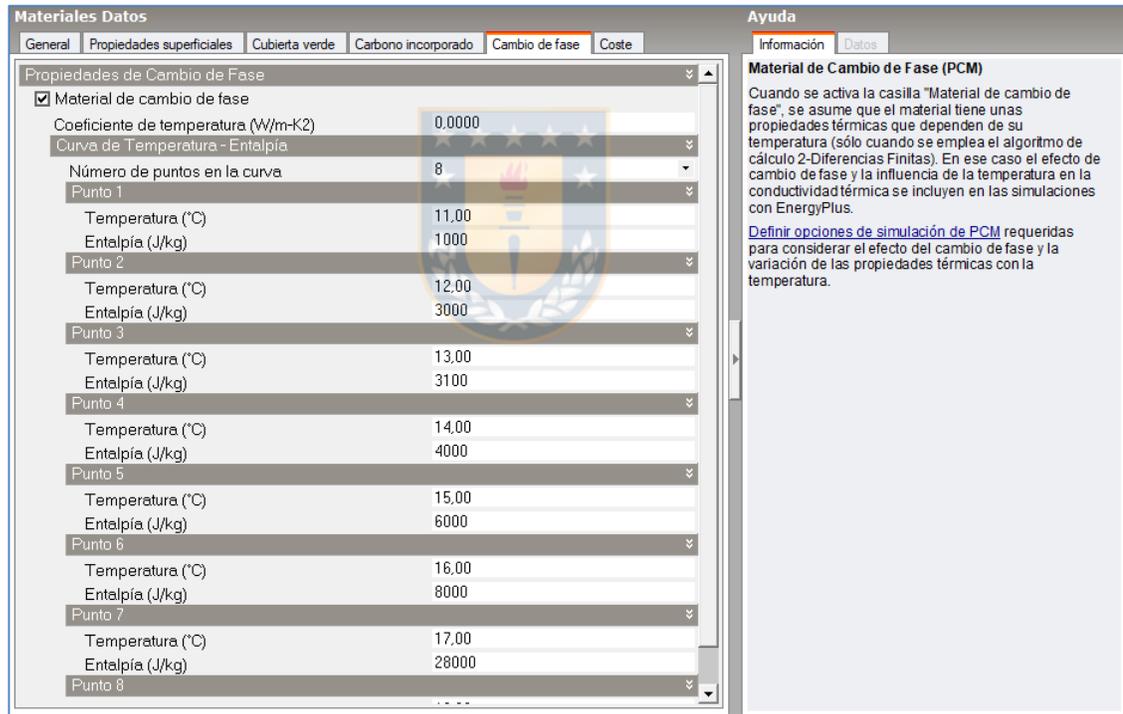


Figura 3.9: Configuración del PCM en el software

Fuente: Elaboración Propia



3.6.3 Cotización PCM RT21

La inversión total del material cambio fase es de \$1.106.679 correspondiente a 160 kg con transporte incluido. Se observa que el costo de transporte afecta considerablemente en su valor (Alemania).

Se realizó cotización del material RT21 en la empresa alemana Rubitherm, se presenta en la figura 3.10.

Pos.	Part-ID / Description	Quantity	U-Price	UQ	Ex-Price	S																
<p>RUBITHERM Rubitherm Technologies GmbH Inhofweg 6 12307 Berlin www.rubitherm.com Tel: +49 30 71 09 622-0 Fax: +49 30 71 09 622-22 OFFER</p>																						
Universidad de Concepcion Diego Sarabia Mendez CHILE			Number : 20190000751 Date : 11.12.2019 Customer : 92000 VAT-ID :																			
<p>We thank you for your interest in Rubitherm products and can offer as follows:</p>																						
1	16010020 RUBITHERM RT 21 1 drum	160 kg	7,99		1.278,40	1																
2	96020102 bankcharges	1	10,00		10,00	1																
3	96020104 Packaging	1	7,50		7,50	1																
<p>The prices are valid 1 month after date of offer.</p> <p>By ordering our material you declare to accept and be bound by the conditions stated below.</p> <p>Orders with a product value <150,00EUR or >5 products in sample quantity carry a 42,00EUR minimum order surcharge</p> <p>Delivery terms: ex works Germany, Customer takes care of the transport. If agreed Rubitherm can arrange the transportation with a third forwarder. (*)Please note, that the quoted shipping prices can differ from the shipping costs at delivery date due to surcharges that are included in the price which are subject to fluctuations on the market. Rubitherm reserves the right to charge the cost difference to the customer and the customer agrees to pay this difference.</p> <p>Standard lead- time: within 4 weeks after payment excl. shipping provided an uninterrupted production</p> <p>Payment condition: prepayment via wire transfer or check. Credit cards are not accepted.</p>																						
<table border="0" style="width:100%"> <tr> <td>Netto VAT.1</td> <td>VAT</td> <td>%</td> <td>Netto VAT. 2</td> <td>VAT</td> <td>%</td> <td>Netto VAT. 0</td> <td>Total Amount</td> </tr> <tr> <td>1.295,90</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>EUR</td> <td>1.295,90</td> </tr> </table>							Netto VAT.1	VAT	%	Netto VAT. 2	VAT	%	Netto VAT. 0	Total Amount	1.295,90						EUR	1.295,90
Netto VAT.1	VAT	%	Netto VAT. 2	VAT	%	Netto VAT. 0	Total Amount															
1.295,90						EUR	1.295,90															

Figura 3.10: Cotización del material RT21.

Fuente: (Rubitherm, 2020)

3.7 Caracterización Macro encapsulación

En esta sección, la placa de macro encapsulación utilizada para el PCM es de materialidad de aluminio, véase figura 3.11, esto aumenta la transferencia de calor en los PCM. Son dos placas que están unidas entre sí. Se unen en dos puntos centrados y se pegan en sus marcos. Pueden ser utilizados para PCM (orgánico - inorgánico). Por lo tanto, se puede ofrecer un rango de temperatura para una variedad de aplicaciones. El grosor depende del volumen de llenado y, por lo tanto, de la capacidad de almacenamiento. Para el estudio se seleccionó el modelo CSM10/5 Rubitherm, el cual su espesor es de 15 mm y puede almacenar 2 Kg de PCM por placa.

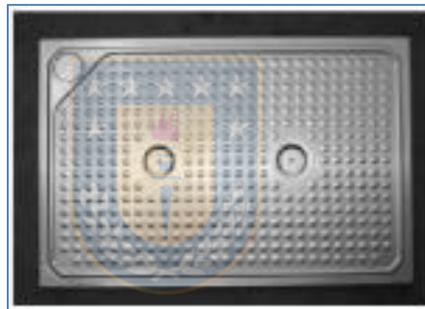


Figura 3.11: Módulo Almacenamiento Macro encapsulación de aluminio

Fuente: (Rubitherm, 2020)

3.7.1 Cotización Macro encapsulación.

La inversión total de la Macro encapsulación de aluminio modelo CSM10/5 Rubitherm es de \$ 4.326.306 correspondiente a 150 unidades con transporte incluido. Se observa que el costo de transporte afecta considerablemente en su valor (Alemania). Se realizó cotización de los elementos de Macro encapsulación de aluminio modelo CSM10/5 Rubitherm, se presenta en la figura 3.12.



Pos.	Part-ID / Description	Quantity	U-Price	UQ	Ex-Price	S
<p>  Rubitherm Technologies GmbH Inhoffweg 6 12207 Berlin www.rubitherm.com Tel: +49 30 71 09 622-0 Fax: +49 30 71 09 622-22 OFFER Number : 20200000431 Date : 24.08.2020 Customer : 92000 VAT-ID : </p>						
<p> Universidad de Concepcion Diego Sarabia Victor Lamas 1290, Region Bio Bio 4070386 Concepcion CHILE </p>						
<p> requested by: Diego Sarabia, dsarabia.mendez@gmail.com We thank you for your interest in Rubitherm products and can offer as follows: </p>						
1	14010011 RUBITHERM CSM 450x300x15 filled with: RT21	150 pc	19,66		2.949,00	1
2	96020102 bankcharges	1	20,00		20,00	1
3	96020104 Packaging	1	15,00		15,00	1
4	96020100 cost for shipping (*)	1	1.700,00		1.700,00	1
total						4.684,00
*alternative)						
5	14010011 RUBITHERM CSM 450x300x15 filled with: RT21HC	150 pc	25,77		3.865,50	1
6	14010011 RUBITHERM CSM 450x300x15 filled with: SP21EK	80 pc	17,83		1.426,40	1
<p> The prices are valid 1 month after date of offer. By ordering our material you declare to accept and be bound by the conditions stated below. Orders with a product value <150,00EUR or >5 products in sample quantity carry a 42,00EUR minimum order surcharge Orders for less than 100 pcs of identical CSM panels carry a minimum order surcharge of 100,00EUR Delivery terms: DAP Concepcion If agreed Rubitherm can arrange the transportation with a third forwarder. (*)Please note, that the quoted shipping prices can differ from the shipping costs at delivery date due to surcharges that are included in the price which are subject to fluctuations on the market. Rubitherm reserves the right to charge the cost difference to the customer and the customer agrees to pay this difference. Standard lead-time: within 4-6weeks after payment </p>						

Figura 3.12: Cotización Macro encapsulación

Fuente: (Rubitherm, 2020)

3.8 Validación muro constructivo con PCM

De acuerdo a los estudios del estado de arte y conocimientos técnicos se validó el sistema constructivo propuesto del muro exterior, en el cumplimiento de resistencia al fuego de acuerdo al catálogo de soluciones constructivas del MINVU y de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C.)



3.8.1 Cumplimiento de la O.G.U.C. y Resistencia al fuego

Dentro de las exigencias a cumplir por la O.G.U.C., se tiene la resistencia al fuego en elementos constructivos según el tipo de recinto. Para el caso del muro de la vivienda en estudio se hace el siguiente análisis.

De la tabla N°3.4 según “destino del edificio”, “superficie edificada (m²)” y “número de pisos” se obtiene una clasificación (a, b, c y d) según corresponda.

En el caso de estudio se tiene una vivienda de 1 piso, por lo que el destino es “Habitacional”, y por número de pisos se establece una clasificación “d”.

Tabla 3.4: Clasificación de los edificios según su destino, superficie edificada y número de pisos.

Destino del Edificio	Superficie Edificada (m ²)	Números de Pisos						
		1	2	3	4	5	6	7 o mas
Habitacional	Cualquiera	d	d	c	c	b	a	a
Hoteles	Sobre 5000	c	b	a	a	a	a	a
	Sobre 1500 y hasta 5000	c	b	b	b	a	a	a
	Sobre 500 y hasta 1500	c	c	b	b	a	a	a
	Hasta 500	d	c	b	b	a	a	a
Oficinas	Sobre 1500	c	c	b	b	b	a	a
	Sobre 500 y hasta 1500	c	c	c	b	b	b	a
	Hasta 500	d	c	c	b	b	b	a
Museos	Sobre 1500	c	c	b	b	b	a	a
	Sobre 500 y hasta 1500	c	c	c	b	b	b	a
	Hasta 500	d	c	c	b	b	b	a
Clinica, Hospitales y Lab.	Sobre 1000	c	b	b	a	a	a	a
	Hasta 1000	c	c	b	b	a	a	a
Policlinicos	Sobre 400	c	c	b	b	b	b	a
	Hasta 400	d	c	c	b	b	b	a
Restaurante	Sobre 500	b	a	a	a	a	a	a
	Sobre 250 y hasta 500	c	b	b	a	a	a	a
	Hasta 250	d	c	c	b	b	a	a
Locales Comerciales	Sobre 500	c	b	b	a	a	a	a
	Sobre 200 y hasta 500	c	c	b	b	a	a	a
	Hasta 200	d	c	b	b	b	a	a



Bibliotecas	Sobre 1500	b	b	a	a	a	a	a
	Sobre 500 y hasta 1500	b	b	b	a	a	a	a
	Sobre 250 y hasta 500	c	b	b	b	a	a	a
	Hasta 250	d	c	b	b	a	a	a
Automotoras	Cualquiera	d	c	c	b	b	b	a
Edificio Estacionamiento	Cualquiera	d	c	c	c	b	b	a

Fuente: (MINVU, Soluciones constructivas acreditadas al fuego, térmico y acústico, 2020)

Para lograr obtener la resistencia al fuego necesaria se debe utilizar además la tabla 3.4, la cual utilizo como criterios la clasificación obtenida de la tabla 3.5 y el tipo de elemento constructivo.

Tabla 3.5: Resistencia al fuego para diferentes elementos de construcción.

Elementos de Construcción									
Tipo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
A	F-180	F-120	F-120	F-120	F-120	F-30	F-60	F-120	F-60
B	F-150	F-120	F-90	F-90	F-90	F-15	F-30	F-90	F-60
C	F-120	F-90	F-60	F-60	F-60	-	F-15	F-60	F-30
D	F-120	F-60	F-60	F-60	F-30	-	-	F-30	F-15

Fuente: (MINVU, Soluciones constructivas acreditadas al fuego, térmico y acústico, 2020)

Simbología:

Elementos verticales:

- (1) Muros cortafuego
- (2) Muros zona vertical de seguridad y caja de escalera
- (3) Muros caja de ascensores
- (4) Muros divisorios entre unidades (hasta la cubierta)
- (5) Elementos soportantes verticales
- (6) Muros no soportantes y tabiques

Elementos verticales y horizontales:

- (7) Escaleras

Elementos Horizontales:

- (8) Elementos soportantes horizontales
- (9) Techumbre incluido cielo falso

Para el caso de los muros que dan al exterior de la vivienda en estudio, se considera en la categoría (5), y según la clasificación obtenida de la tabla 3.5 (d) se tiene un grado de resistencia al fuego F-30.

Para cumplir con esta exigencia se utiliza una solución del catálogo de soluciones constructivas del MINVU, la cual se presenta a continuación:

Tabla 3.6: Tabique perimetral estructura madera en vivienda en estudio.

A.2.3.30.14	Tabique Estructura Madera, Volcanita 15 mm RF, Placa OSB 9 mm, Siding Volcan 6 mm Aislanglas R122 50 mm				
<p>Elemento está formado por una estructura de madera hecha con listones de pino radiata de 2" x 3" en bruto. Consta de 5 pie-derechos distanciados entre ejes cada 0,6 m, dos cadenetras distanciadas entre ejes cada 0,8 m, una solera inferior y otra superior. Esta estructuración esta forrada por una de sus caras con una plancha de yeso-cartón "Volcanita RF" de 15 mm de espesor. La otra cara esta forrada con una placa de madera OSB de 9 mm de espesor y como terminación en esta cara lleva unas fajas horizontales de fibrocemento "Siding Volcan" tipo tinglado de 190 mm de ancho y 6 mm de espesor. Todo el conjunto esta atornillado a la estructura de madera. Esta conformación deja espacios libres en el interior del panel están rellenos con una manta de lana de vidrio tipo rollo libre R122 de 50 mm de espesor de densidad media aparente de 14 kg/m³. Las dimensiones para el ensayo fue 2,2 de ancho x 2,4 de alto y 105 mm de espesor.</p>					
INSTITUCION	N° Informe	Lab.	Fecha	Resistencia	Inscripción
Volcán S.A.	374.721	IDIEM	26-06-96	F-30	2015

Fuente: (MINVU, Soluciones constructivas acreditadas al fuego, térmico y acústico, 2020)



Otra de las exigencias por parte de la O.G.U.C es el cumplimiento de la reglamentación térmica mostrado en la tabla 3.2., para esto se compara las transmitancias térmicas exigidas con las envolventes de los elementos constructivos de la vivienda en estudio. Para el caso del muro donde se incorporará el PCM se seleccionó de acuerdo al listado de soluciones constructivas del MINVU para validar la resistencia al fuego. En la figura 3.13, se visualiza las componentes de la envolvente del muro con PCM

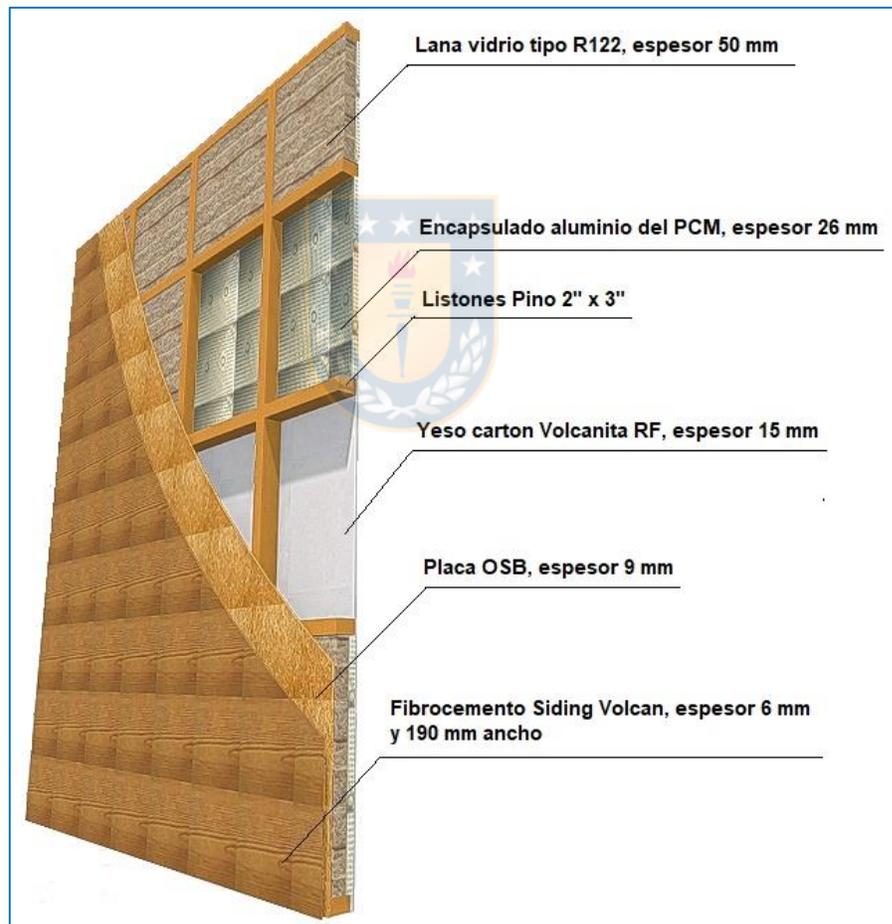


Figura 3.13: Sistema Constructivo Muro exterior con PCM en vivienda estudio.

Fuente: Elaboración Propia



CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN



En este segmento, se evaluó el comportamiento energético de los materiales cambio fase mediante el software Energy Plus. Los materiales cambio fase se produce dentro de placas de macro encapsulación de aluminio al interior de los muros exteriores.

Por lo tanto, se observó el aporte energético de los materiales cambio fase en un sistema activo de calefacción, optimizando los sistemas constructivos en la vivienda en estudio y dar respuesta a su aplicación en acondicionamiento ambiental.

4.1 Comportamiento Energéticos de los materiales cambio fase.

A continuación, se comparó el comportamiento energético de dos sistemas de climatización con el aporte energético pasivo de los distintos materiales cambio fase en una vivienda en estudio.

4.1.1 Rendimiento energético de calefacción con y sin PCM.

Para evaluar el comportamiento energético, se definió la temperatura de fusión de los PCM en el rango de 18 a 22°C, el aporte energético de los PCM ayudo a mantener constante la temperatura confort de 21°C en la vivienda y reducir los consumos energéticos del sistema activo; para este estudio se escogió dos sistemas de climatización caso 1: calefacción a leña con un $\eta=0,7$ y caso 2: Climatización por bomba de calor $\eta=2,7$; esta selección se debe a que el sistema de calefacción a leña es el más usado en la zona, genera una alta contaminación ambiental por su combustión en material particulado, es el combustible más económico por unidad de energía y su inversión es accesible, en cambio los equipos de bomba calor tienen un mayor rendimiento energético, tiene menos impacto al medio ambiente y su inversión es costosa.



La figura 4.1 (a) muestra las potencias máximas de diseño en climatización, comparando la línea base con la implementación de materiales PCM en vivienda en estudio ubicado en Concepción, Chile. A través de este análisis, se identificó una disminución en su potencia de diseño de 31,9% (de 2,63 kW a un 1,79 kW) con respecto al caso base.

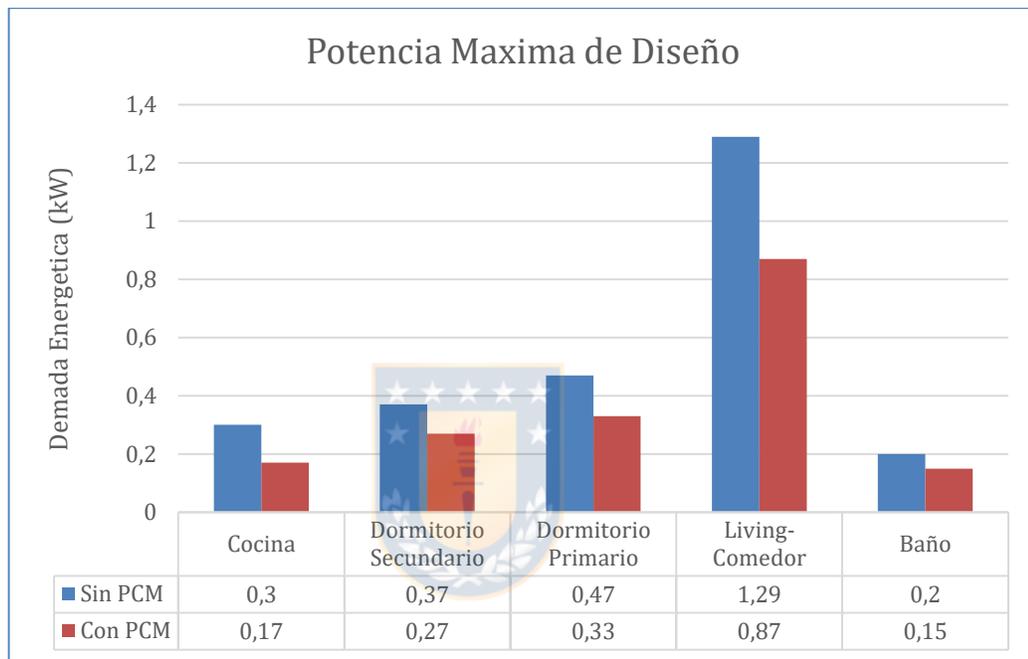


Figura 4.1 (a): Potencia máxima diseño con y sin PCM en vivienda estudio

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 4.1 (b) y (c) se realizó la comparación de distintos tipos de materiales PCM con un rango de temperatura de fusión entre 18 °C a 22°C, para determinar cuál es más eficiente en función de las variables de diseño, emplazamientos y propiedades térmicas.

Para el primer caso, se evaluó el sistema de calefacción a leña y el rol clave de estos materiales PCM es reducir el consumo energético y el kgCO₂ generado por la combustión. En los resultados se visualizó que el material cambio fase optimo corresponde al PCM 22HC arrojando una reducción del consumo energético de 34,1% (de 3694 kWh a un 2434 kWh) en comparación al caso base.



Para el segundo caso, se evaluó un sistema de bomba de calor multisplit, al igual que en el caso anterior el material optimo corresponde al PCM 22HC, se observó una disminución de consumo energético de un 34,4% (de 688 kWh a un 451 kWh) en comparación al caso base.

Para ambos casos se observó una notable reducción de los consumos energéticos en estación fría.

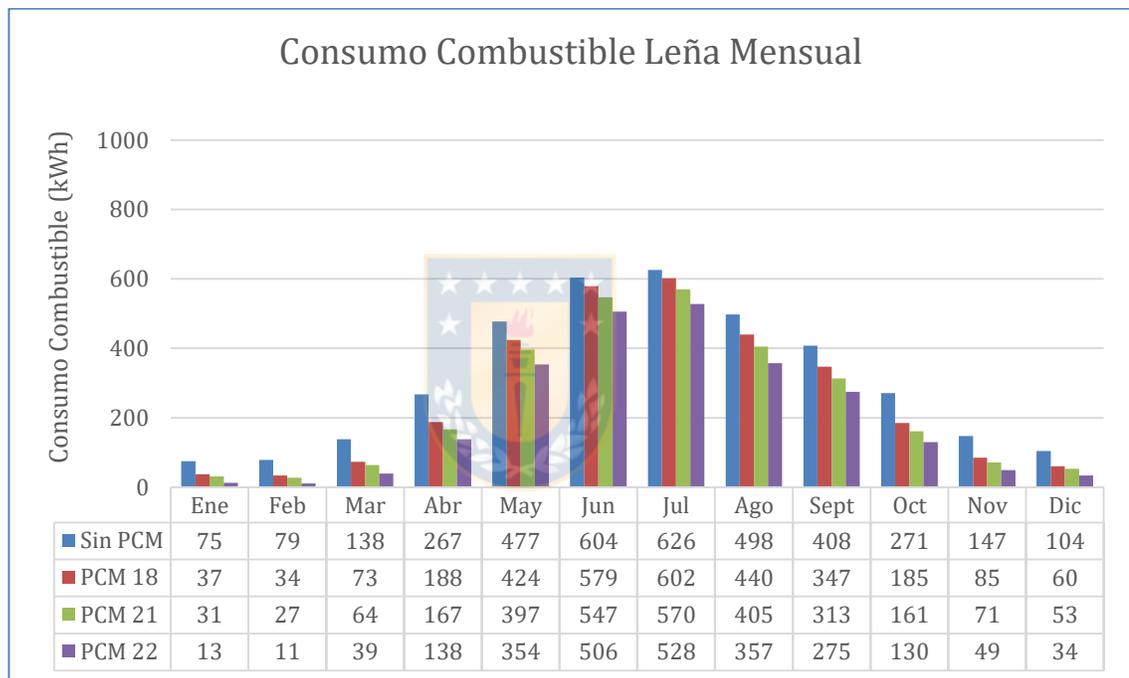


Figura 4.1 (b): Caso 1 - Consumo energético en calefacción Leña con y sin PCM en vivienda estudio
Fuente: Elaboración Propia

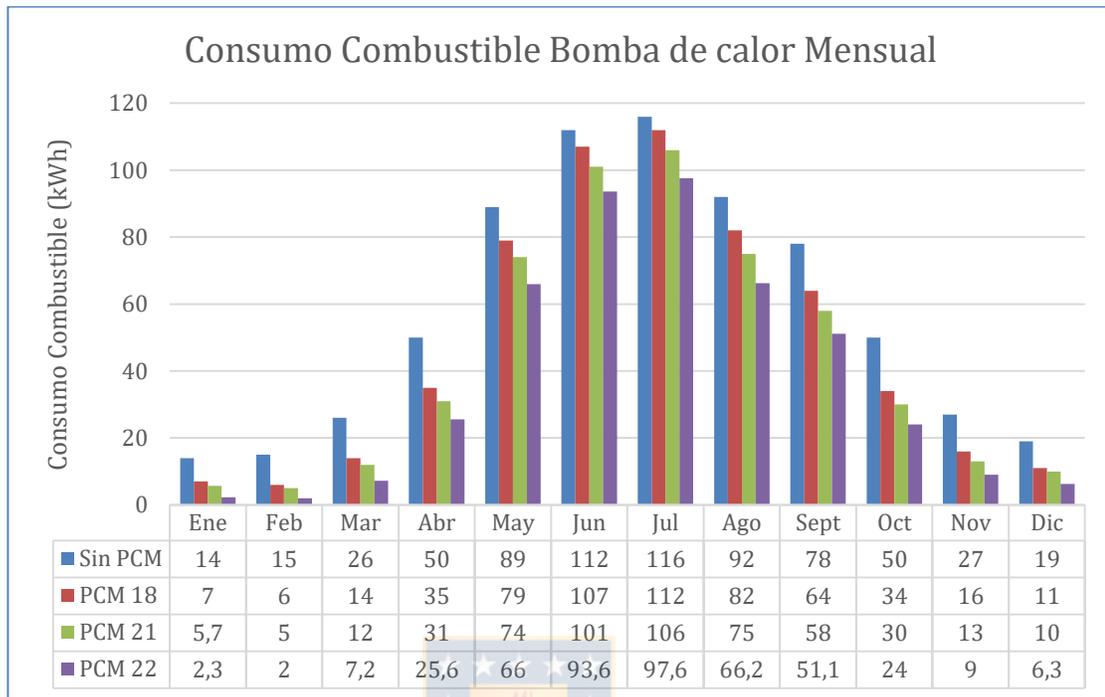


Figura 4.1 (c): Caso 2 - Consumo energético Bomba de calor con y sin PCM en vivienda estudio.

Fuente: Elaboración Propia

Se identificó que la temperatura de fusión más baja de los PCM no es viable en la optimización del sistema pasivo en climatización, podría ser explicado por las variables temperatura exteriores dependiendo de las condiciones climáticas por su emplazamiento. Por ejemplo, de acuerdo con las cargas máximas de calefacción, se debe a que la energía en invierno aumento estableciendo las temperaturas de confort térmico, esta es una variable de selección del PCM, que servirá para optimizar el diseño en función del confort térmico, disminuyendo demanda energética, perdidas caloríficas y consumos energéticos de sistemas de calefacción activos.

Según el estado de arte otro punto importante a comentar es tener en cuenta que las curvas de entalpia y temperatura, tanto para refrigeración y calefacción deben ser lo más cercana posible, de lo contrario se produciría una



histéresis o sub enfriamiento y afectaría considerablemente el rendimiento del PCM en su aplicación.

Para la implementación de sistemas activos sustentables en climatización, se demuestra en el estudio que el aporte energético de los PCM es mantener la temperatura constante dentro de los espacios interiores y ayudan también a bajar considerablemente los consumos energéticos y es un aporte al medio ambiente.

Para sistemas pasivos, la eficiencia en los PCM en los muros exteriores podría incrementarse, sugiriendo que haya acristalamiento a base de muros cortina durante el día, lleva al PCM al proceso de cambio de fase de manera estable en el tiempo, debido a su almacenamiento térmico (F. Ascione, R.F. De Masi, F. de Rossi, S. Ruggiero & G.P. Vanoli, 2016).

Además, la disminución de un 31,9% en potencia máxima de diseño para equipos de climatización arrojado en este estudio y un promedio de 33% en reducción en consumo energético en los dos casos de climatización propuestos, se puede inferir que los materiales cambio fase es capaz de contribuir a eficiencia energética.

4.1.2 Inversión inicial y costos operativos en sistemas de calefacción con y sin PCM.

Se hizo un análisis de los principales costos asociados a la adquisición de los equipos y operación de éstos. No se considerará valor residual o de salvamiento. Para poder comparar, la vida útil a usar será de 10 años.

Al obtener los valores de consumos energéticos en las simulaciones de los casos propuestos, se visualiza una aproximación en demostrar el beneficio económico que aporta los PCM a los sistemas activos. Vease en figura 4.2

En el caso 1 sistema de calefacción a leña, se observó una disminución en los costos de operación anual de un 34,1% (de \$88.656 a un \$58.416) (\$ 24 por kWh) (BES, 2017) y en el caso 2 sistema de climatización por bomba



calor se observó una disminución en los costos de operación anual de un 34,4% (de \$72.928 a un \$47.795) (\$ 106 por kWh) (BES, 2017)

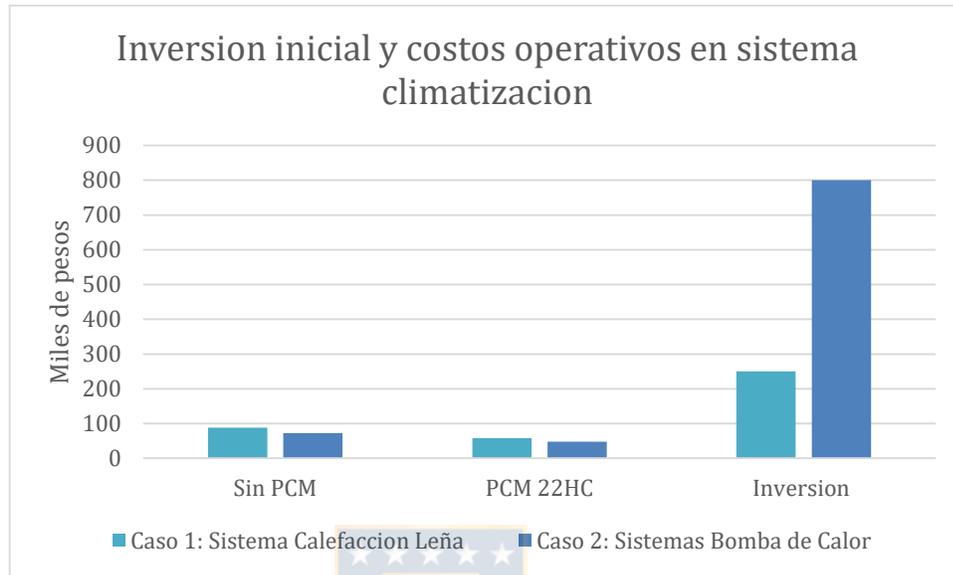


Figura 4.2: Inversión inicial y costos operativos sistema climatización con y sin PCM en vivienda estudio.

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Propuesta de aplicación PCM a caso base como sistema de actualización

Según los resultados del comportamiento energético de la vivienda en estudio con y sin PCM, Se identificó un enfoque diferente e innovador para sistemas pasivos de acondicionamiento ambiental o el aporte energético significativo de los PCM a los sistemas activos para mantener su temperatura constante en su operación.

Una correcta ubicación del PCM a los muros exteriores de una vivienda en estudio mostro significativamente un ahorro de energía con respecto al caso base, esto se debe a la colocación del PCM en la partición interna en los muros exteriores, emplazamiento de la vivienda, tipo de encapsulación y orientación de los muros con respecto al sol.



El tipo de encapsulación de acuerdo al panel constructivo mostro que debe ser macro encapsulación con materialidad de aluminio para aumentar la conductividad térmica de los materiales cambio fase que era una de sus desventajas técnicas.

A través de este análisis, se identificó que material de cambio de fase se debe seleccionar de acuerdo a la aplicación pasiva en vivienda en estudio, considerando variables de selección como cinéticas, físicas, químicas, térmicas y económicas.

Finalmente, se observó que es posible maximizar la eficiencia de la energía en mantener la temperatura constante en los espacios interiores con el aporte energético de los sistemas pasivos cuando se usa materiales cambio fase en los muros exteriores de la vivienda en estudio. Además, el PCM con temperatura de fusión cercana a la temperatura confort logra un mayor rendimiento energético según su emplazamiento y reduce considerablemente los costos de operación de un sistema climatización activo aportándole energía.



CONCLUSIONES

El trabajo reciente propone un análisis de optimización del PCM a una vivienda en estudio como una aplicación de actualización a sistemas pasivos y se evaluó el comportamiento energético de dos sistemas activos de climatización mediante el uso del software EnergyPlus.

En este estudio, se describe la selección de materiales de cambio fase a utilizar, la encapsulación adecuada en base a la aplicación y propiedades de diseño.

En el análisis del comportamiento energético de la vivienda en estudio, se observó que el PCM adecuado según la temperatura de fusión está en el rango de 18 a 22 °C cercano a la temperatura de confort térmico. Para este estudio se escogió el PCM 22HC ya que su comportamiento es ideal para la vivienda en estudio, arrojando un 31,9% (de 2,63 kW a un 1,79 kW) de reducción de potencias máximas de diseño en climatización. De acuerdo al PCM escogido se analizó el comportamiento del consumo energético en dos sistemas de climatización. Caso 1 Sistema calefacción a leña, mostro una reducción del consumo energético de 34,1% (de 3694 kWh a un 2434 kWh). Para el segundo caso, se evaluó un sistema de bomba de calor multisplit, al igual que en el caso anterior el material óptimo corresponde al PCM 22HC, se observa una disminución de consumo energético de un 34,4% (de 688 kWh a un 451 kWh) en comparación al caso base, lo que implica una notable reducción de los consumos energéticos en la estación fría. Además, junto con los valores de consumo energético, se evaluó los costos de operación anual arrojando una disminución promedio de 34 % debido al aporte de los PCM.

En general, estos resultados sostienen firmemente que es posible mejorar la eficiencia del ahorro energético cuando los PCM se instala en los muros exteriores, maximizando los ahorros energéticos. Por lo tanto, para lograr la optimización de la envolvente de la vivienda con aplicación PCM, la temperatura



de fusión fue de 22 ° C y el macro encapsulamiento es de material de aluminio mejorando su transmitancia térmica del flujo de calor en los paneles constructivos, dando como resultado una adecuada actualización a la aplicación y a la instalación de los PCM a la vivienda en estudio ubicada en Concepción, Chile.

Los costos de implementación en la tecnología pasiva como los PCM tiene un elevado valor debido al costo del transporte (Alemania), se podría justificar encargando por mayor estos insumos y aplicarlo a un lote de viviendas.

Es importante aplicar el PCM optimizado considerando el enfoque y variables de diseño como la condición climática, temperatura de fusión de PCM, encapsulamiento y irradiación solar.

La implementación de esta tecnología demuestra que aporta en la reducción de material particulado en zonas críticas en contaminación y las emisiones de CO₂, aportando al medio ambiente.

Se deberá tener en cuenta que las curvas de entalpia y temperatura de los PCM, tanto para refrigeración y calefacción deben ser lo más cercana posible, de lo contrario se produciría una histéresis o subenfriamiento y afectaría considerablemente el rendimiento del PCM en su aplicación.

Como investigación adicional queda por explorar la optimización de PCM aplicado a paredes exteriores con persianas de acristalamiento o invernaderos adosados, al poseer mayor captación de energía solar, tendrá un mayor almacenamiento energético y retraso térmico en los muros aplicado con PCM y obtener una segmentación de los datos climáticos por zonas para investigar el comportamiento energético en aplicaciones pasivas.



REFERENCIAS

- A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj & R.V. Seeniraj. (2008). Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management. *Applied Thermal Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.016>
- Akeiber. H.. Nejat. P.. Majid. M. Z. A.. Wahid. M. A.. Jomehzadeh. F.. Zeynali Famileh. I.Zaki. S. A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1470–1497. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>
- Al-Saadi. S. N.. & Zhai. Z. (2013). Modeling phase change materials embedded in building enclosure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*., 659–673. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.024>
- Anisur, M. (2013). Curbing global warming with phase change materials for energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 23-30. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.014>
- B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 251–283. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 251–283.



- Bello, R. E. Muñoz, M. M. Vasco, C. (2015). Envoltentes térmicas modificadas con materiales de cambio de fase para ahorro energético en la climatización de viviendas en Chile. frío y calor. Obtenido de http://www.frioycalor.cl/revistas/rev_134.pdf
- BES. (2017). Contaminación atmosférica: atacando el síntoma, no la enfermedad. Informe BES.
- CCHC. (2010). Manual Técnico Reacondicionamiento Térmico de viviendas en uso. Corporación de desarrollo tecnológico de la cámara chilena de la construcción. Obtenido de http://www.cchc.cl/uploads/comunicacion/archivos/manual_CDT_2016.pdf
- CDT. (2019). Informe final usos de la energía en hogares Chile. CDT. Obtenido de <https://www.cdt.cl/2019/12/nuevo-estudio-de-consumo-energetico-residencial/f>
- Chwieduk. (2013). Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries. Energy, 301–313. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.066>
- D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert & B.T. Griffith. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Build. Environ, 661–673. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang & C.O. Pedersen. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy Build, 319–331. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)



- Devaux. P. & Farid. M. (2017). Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter. *Applied Energy*, 593–602. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.060>
- Dincer I. & Rosen M. (2002). *Thermal energy storage, systems and applications*. England: John Wiley & Sons, Chichester. Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-75997-3_558
- DOE. (2016). *Engineering Reference. EnergyPlus Version 85 Doc US Dep Energy*. Obtenido de <https://windows.lbl.gov/sites/default/files/engineeringreference.pdf>
- F. Ascione, R.F. De Masi, F. de Rossi, S. Ruggiero & G.P. Vanoli. (2016). Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: performance analysis of residential case study. *Appl. Energy*, 938–957. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.027>
- Fan. L. & Khodadadi. J. M. (2011). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24–46. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.007>
- Gawron, S. &. (1981). Latent heat storage. *Energy Research*, 103-109. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/er.4440050202>
- Jamil. H.. Alam. M.. Sanjayan. J.. & Wilson. J. (2017). Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building. *Energy and Buildings*, 217–229. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.064>



Juarez,D., Balart. R., Ferrandiz, S. & Garcia, D. (2012). Study of phase change materials (pcm) and sem analysis of micro pcm. Obtenido de <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2012/11/cambio-de-fase.pdf>

K.O. Lee, M. M. (2016). Development and verification of an EnergyPlusbased algorithm to predict heat transfer through building walls integrated with phase change materials. J. Build. Phys, 77–95. Obtenido de <https://doi.org/10.1177/1744259115591252>

Lane, G. (1986). Solar heat storage: Latent heat materials. Estados Unidos: Volume II. Technology, Boca Raton. Obtenido de <https://www.osti.gov/biblio/6972497-solar-heat-storage-latent-heat-materials-volume-ii-technology>

Ling. H.. Chen. C.. Qin. H.. Wei. S.. Lin. J.. Li. N.. (s.f.). Indicators evaluating thermal inertia performance of envelops with phase change material. Energy and Buildings, 175–184. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.009>

M. Kenisarin & K. Mahkamov. (2007). Solar energy storage using phase change materials,. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1913-1965. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.005>

Marin. P.. Saffari. M.. de Gracia. A.. Zhu. X.. Farid. M. M.. Cabeza. L. F.. & Ushak. S. (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. Energy and Buildings, 274–283. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>

MINVU. (2017). Manual de aplicación y reglamentación térmica. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Obtenido de http://admminvuv57.minvu.cl/opensite_20070417155724.aspx



- MINVU. (2018). Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. MINVU. Obtenido de <https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/EST%C3%81NDARES-DE-CONSTRUCCI%C3%93N-SUSTENTABLE-PARA-VIVIENDAS-DE-CHILE-TOMO-V-IMPACTO-AMBIENTAL.pdf>
- MINVU. (2020). Soluciones constructivas acreditadas al fuego, térmico y acústico. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Obtenido de <https://www.minvu.cl/construccion-en-madera/>
- Oró, E. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 513-533. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>
- PRIEN. (2002). Las fuentes renovables de energía y el uso eficiente. Chile Sustentable. Obtenido de <http://www.chilesustentable.net/wp-content/uploads/2002/10/LAS-FUENTES-RENOVABLES-DE-ENERGIA-Y-EL-USO-EFICIENTE.pdf>
- Ramírez, A., Santos, A. & González N. (2012). PCM choosing and classification according to their characteristics for their application for thermal energy storage systems. *Materiales de Construcción*. Obtenido de <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>
- Ramírez, A., Santos, A. & González N. (2012). Physical and mechanical characterization of gypsum boards containing phase change materials for latent heat storage. *Materiales de Construcción*, 465-484. Obtenido de <https://doi.org/10.3989/mc.2011.53309>
- Rubitherm. (2020). *Materiales cambio fase*. Berlin , Alemania. Obtenido de <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>



S. E. Kalnæs & B. P. Jelle. (2015). Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities. *Energy and Buildings*, 150-176. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>

S. E. Kalnaes and B. P. Jelle. (2015). Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities. *Energy and Buildings*, 150-176. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>

Scalat S., Banu D., Hawes D., Paris J., Haghghata F., Feldman D. (1996). Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 49-61. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(96\)00017-7](https://doi.org/10.1016/0927-0248(96)00017-7)

Sharma, A. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable & sustainable energy reviews*, 318-345. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107001402>

Soares. N.. Costa. J. J.. Gaspar. A. R.. & Santos. P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 82–103. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>

Soares. N.. Gaspar. A. R.. Santos. P.. & Costa. J. (2014). Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. *Energy and Buildings*, 411–421. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.072>

Thorpe, D. (2011). *The earthscan expert guide to using solar energy for heating, cooling and electricity*. Earthscan London. SolarTechnology. Obtenido de <https://doi.org/10.4324/9780203588666>



- V. Tyagi & D. Buddhi. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1146–1166. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>
- Wegertseder, P. (2015). Diagnóstico y análisis multifactorial en viviendas sociales del centro-sur de Chile. Concepcion: Universidad del Bio Bio. Obtenido de <http://repopib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1237>
- Zhou. D.. Tian. Y.. Qu. Y.. & Chen. Y. K. (2016). Thermal analysis of phase change material board (PCMB) under weather conditions in the summer. *Applied Thermal Engineering*, 690–702. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.121>

