

El cambio de fase como estrategia pasiva: Evaluación del rendimiento térmico-energético en edificaciones en Panamá



Phase Change as a Passive Strategy: Evaluation of the Thermal-energy Performance in Buildings in Panama

Berrocal, Diana; Aranda, Rubí; Santamaría¹, Steyci; Vigil, Aníbal; Chen, Miguel

Diana Berrocal
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
Rubí Aranda
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
Steyci Santamaría¹
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
Aníbal Vigil
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
Miguel Chen
mighel.chen@utp.ac.pa
Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá

Revista de I+D Tecnológico
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
ISSN: 1680-8894
ISSN-e: 2219-6714
Periodicidad: Semestral
vol. 18, núm. 1, 2022
orlando.aguilar@utp.ac.pa

Recepción: 03 Junio 2021
Corregido: 06 Diciembre 2021
Aprobación: 17 Diciembre 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/339/3392967002/>

DOI: <https://doi.org/10.33412/idt.v17.2.3478>



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Resumen: . Grandes esfuerzos han sido enfocados en hallar formas que permitan reducir el consumo energético, ya que actualmente la producción de energía es uno de los grandes contaminantes atmosféricos. Así, una estrategia que parece ser efectiva es la implementación de Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Materials, PCM), que debido a su alta cantidad de energía tiene la capacidad de almacenar una cantidad significativa de energía. De aquí surge el objetivo de evaluar diferentes materiales de cambio de fase para determinar su influencia en la mejorar el confort interno de los edificios, y que no impacten negativamente al ambiente. Se lleva a cabo una revisión literaria sobre la aplicación de materiales de cambio de fase como elemento pasivo en la construcción de edificios y las mejoras energéticas que brinda. Se detallan las metodologías utilizadas en las simulaciones y experimentos llevados a cabo en otras investigaciones, así como la descripción de los materiales de cambio de fase estudiados. Se identifican los criterios de evaluación utilizados los cuales permiten analizar el comportamiento energético de los materiales de cambio de fase, y se describe su desempeño energético. Finalmente, se evalúa el desempeño energético de cinco materiales de cambio de fase, bajo el clima de la Ciudad de Panamá, por medio de una simulación realizada en DesignBuilder, basados en los mismos indicadores de desempeño antes establecidos, de donde se obtiene que el material de cambio de fase PCM1 es el que presenta mejor desempeño.

Palabras clave: Materiales de cambio de fase, almacenamiento de energía, estrategia pasiva, masa térmica, simulación, Materiales de cambio de fase, almacenamiento de energía, estrategia pasiva, masa térmica, simulación.

Abstract: . Great efforts have been focused on finding ways to reduce energy consumption, since energy production is currently one of the major atmospheric pollutants. Thus, one strategy that seems to be effective is the implementation of Phase Change Materials (PCM), which due to their high latent heat can store a significant amount of energy. From this arises the objective of evaluating different phase change materials to determine their influence in improving the internal comfort of buildings, and that they do not negatively impact the environment. A literature review is carried out on the application of phase change materials as a passive element in building construction

and the energy improvements it provides. The methodologies used in the simulations and experiments carried out in other investigations are detailed, as well as the description of the phase change materials studied. The evaluation criteria used to analyse the energetic behavior of the phase change materials are identified, and their energetic performance is described. Finally, the energy performance of five phase change materials is evaluated, under the climate of Panama City, by means of a simulation performed in DesignBuilder, based on the same performance indicators previously established, from which it is obtained that the phase change material PCM1 is the one that presents the best performance.

Keywords: Phase change materials, energy storage, passive strategy, thermal mass, simulation, Phase change materials, energy storage, passive strategy, thermal mass, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a las preocupaciones por el medio ambiente, el inevitable cambio climático durante los últimos años, y el Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se han dedicado grandes esfuerzos en hallar formas que permitan reducir el consumo energético, ya que

actualmente la producción de energía es uno de los grandes contaminantes atmosféricos. El confort térmico de los ocupantes está relacionado con la capacidad de almacenamiento térmico de las paredes, las cuales tienen mayor capacidad entre más gruesas sean. Sin embargo, existen algunas restricciones que llevan a la construcción de paredes cada vez más ligeras para aligerar los costos [1]. El uso de medios activos para alcanzar el confort de los ocupantes se encuentra restringidos por el antes mencionado Acuerdo de París. Así, una estrategia que parece ser efectiva es la implementación de Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Materials, PCM), que debido a su alta cantidad de energía tiene la capacidad de almacenar una cantidad significativa de energía, lo que usado correctamente puede ayudar a reducir las temperaturas internas de un recinto y a su vez su demanda energética. Esto los hace más eficientes que los materiales convencionales, al minimizar las tasas de transferencia de calor en las horas pico y eliminar las variaciones en la temperatura interna de un recinto [2].

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (EIA) [3], el consumo energético en edificios en 2015 era cerca del 20% de la energía producida a nivel mundial, y según la Oficina de Ahorro Energético en Edificios de Singapur [4], más del 50% de la energía que consume un edificio se debe al acondicionamiento del aire. De aquí surge la motivación de llevar a cabo investigaciones sobre métodos pasivos para la climatización, como lo es la investigación de diferentes materiales en el sector de la construcción que permitan mejorar el confort interno de los edificios, y que no impacten negativamente al ambiente. Es por esto que, en el presente trabajo se hace una revisión literaria sobre diversos experimentos y simulaciones de distintos materiales de cambio de fase, que demuestren su uso pasivo para mejorar la masa térmica de un recinto. Se describe la metodología utilizada para la selección de artículos, se define el concepto de PCM, se analiza la metodología utilizada para su estudio, se listan los PCM más estudiados en las investigaciones, se definen los criterios de evaluación, se analizan la evaluación del desempeño de diversos PCM. Finalmente se desarrolla una simulación dinámica energética para analizar el comportamiento de cinco PCM utilizados en las diversas investigaciones encontradas.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Definición de PCM

Los materiales de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM), tienen alta capacidad de almacenamiento de energía debido a su elevado calor latente que representa la cantidad de energía que almacena un material mientras ocurre cambio de fase ante una temperatura determinada. Así, al introducir PCM como un elemento de construcción ocurre almacenamiento y liberación de energía, dependiendo de las condiciones ambientales externas, lo que permite amortizar las variaciones de temperatura en el interior del recinto y a su vez reduce los requerimientos de acondicionamiento del aire.

Los PCM más utilizados son los orgánicos, específicamente los de parafina, ácidos grasos y polietilenglicol (PEG), debido a que tienen alta cantidad de energía y estabilidad química. Sin embargo, tienen la desventaja de baja conductividad térmica lo que reduce la capacidad de explotación del elevada cantidad de energía [5]. Los PCM pueden incorporarse a la estructura de forma directa, siendo impregnados en el yeso, hormigón o concreto, o también puede ser encapsulado microscópicamente en cápsulas de polímeros formando una especie de polvo [6-10]. Debido a que durante el cambio de fase dicho PCM pasará a una fase líquida, deben evitarse fugas [3],[5]. Es por esto que el producto final se distribuye como un panel, o incluso se ha implementado su uso junto a polímeros para obtener geles las cuales tienen mayor estabilidad mecánica durante su cambio de fase [11-12].

2.2 Implementación de materiales de cambio de fase como estrategia pasiva en edificaciones

La mayor parte de las investigaciones han sido desarrolladas a través de simulaciones, siendo la principal herramienta el software EnergyPlus, el cual es un programa completo para simular el comportamiento energético de edificios [13], y fue desarrollado por el Departamento de Energía (Department of Energy, DOE) en USA. Tal es el caso de Evola, et al. [5], quienes realizaron una simulación dinámica para observar el comportamiento de paneles de PCM microencapsulados en un edificio de oficinas para diferentes zonas climáticas en Europa, durante el verano.

Li, et al. [14], también utilizaron este software para simular el comportamiento energético de edificios ligeros con y sin PCM instalados, utilizando como data climatológica entrante la proveniente del observatorio

meteorológico JTR13C. Un trabajo similar fue la simulación llevada a cabo por Rahimpour, et al. [15], quienes modelaron edificios ligeros, de ladrillos y de peso ligero mejorados con PCM en diversas ciudades australianas. Mohd et al. [16], incluyeron el uso del aire acondicionado y simularon su uso durante las 24 horas, y durante el horario de oficina en Putrajaya, Malasia. En el caso de Arce, et al. [17], se utilizó EnergyPlus en conjunto con SketchUp y OpenStudio para crear el modelo con PCM y evaluar su comportamiento en diferentes localidades. La investigación de Auzeby, et al. [18], utilizó el software de simulación dinámica DesignBuilder [19], el cual es una de las interfaces más sencillas del EnergyPlus.

Adicionalmente se han desarrollado simulaciones utilizando el método de diferencias finitas como Cao, et al. [20], quienes usaron el enfoque de equilibrio energético con condiciones límite para simular el efecto que tiene la adición de PCM microencapsulado, o en su otra investigación Cao, et al. [21], que consideró que no hay intercambio de calor con el suelo, se asume que el techo y el piso están aislados, no hay generación de calor y se omite la convección del PCM fundido.

En cuanto a las experimentaciones, Laaouatni, et al. [1], construyeron una pared de bloque con PCM sol-gel en sus cavidades y tubos para ventilación, a la cual aplicaron calor de un lado por medio de una resistencia y se usaron termopares para medición de la temperatura en diversos puntos. Jahangir, et al. [22], construyeron

una pared sándwich cuya capa intermedia contenía PCM, las paredes eran de cemento en un caso, y de ladrillo y yeso en el otro. Utilizaron agua caliente para simular el ambiente de alta temperatura, y agua a temperatura ambiente para simular el ambiente de confort. Li, et al. [23], construyeron una pared convencional de ladrillo, y una pared con una capa de PCM.

El PCM orgánico la parafina, es el más utilizado en la mayoría de los artículos científicos revisados. Tal es el caso de Evola, et al. [5], quienes trabajaron con un panel de parafina micro encapsulada en matriz de panel; Auzéby, et al. [18], cuyo PCM consistía de parafina encapsulada en polietileno de alta densidad; Laouatni, et al. [1], que también utilizaron una mezcla de parafina y estireno polímero, pero en forma de sol-gel; Jahangir, et al. [22], usaron cera de parafina P56-58; Arce, et al. [17], utilizaron PCM (Dupont Energain) [13-14], y PCM de Parafina Octadecante C18. Cao, et al. [20], desarrolló

un primer estudio sobre una pared de hormigón geopolímero con microcápsulas Rubirtherm PSDVB/RT27 y comerciales Microtek MPCN24D (MF/PCM24), que tienen un núcleo de parafina, y posteriormente desarrolló un estudio con la misma pared geo polímero, pero en una configuración sándwich en la cual la capa intermedia es de PCM21, conocido como RT21 y cuyo núcleo es de parafina. También se han trabajado con BioPCM en forma de láminas delgadas donde se encapsula el PCM, y Manta BioPCM fabricado por Phase Change Energy, [15,16].

De la revisión literaria realizada se encontró que las investigaciones de PCM inorgánicos estaban destinadas a la creación de nuevos materiales de este tipo como en el caso de Guo, et al. [24], quienes desarrollaron un compuesto a base de calcio (sólido - líquido) nombrado PCM-Ca, el cual contiene hexahidrato de cloruro de calcio, el modificador tetrahidrato de nitrato de calcio y como agente nucleante el hexahidrato de cloruro de estroncio. También Yang, et al. [25], trabajaron en el desarrollo de un PCM inorgánico de polietilenglicol (PEG) y sol de sílice como vehículo poroso inorgánico.

2.3 Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación son aquellos parámetros que permiten comparar el comportamiento del PCM y determinar si estos son efectivos y en qué condición son más eficientes. En la literatura revisada se observa que el criterio de evaluación más utilizado es la temperatura interna del recinto, la cual es medida y comparada con valores de referencia para observar si hay un verdadero acercamiento a la temperatura de confort interna. Otros criterios de evaluación preferidos son la ubicación del PCM en el recinto y cómo afecta ésta a su comportamiento; la frecuencia de activación, que indica durante cuánto tiempo el PCM se encuentra cambiando de fase y es menor en países con alta irradiación solar debido a que esta intensidad acelera el proceso de cambio de fase y produce un menor aprovechamiento; el espesor del PCM en paredes sándwich; el uso de ventilación para optimizar el desempeño del PCM; la capacidad de explotación del PCM, la cual se mantiene en valores razonables siempre que este sea elegido de acuerdo al clima de la zona donde es utilizado; y, la demanda energética para refrigeración, y cómo esta disminuye al utilizar PCM.

Adicionalmente, se ha observado que se tiende a evaluar el comportamiento del PCM junto a otros materiales. Por ejemplo, se ha evaluado el flujo de calor máximo que se da en materiales convencionales, y comparado con el flujo de calor máximo que se da en un PCM. De igual manera, se ha colocado PCM junto a aislantes térmicos y se ha evaluado cuál de los dos materiales debe colocarse primero para aumentar su eficiencia.

2.4 Determinación del desempeño de varios PCM

El desempeño de los PCM se evalúa en función de los criterios de evaluación antes mencionados. Para lograr comparar adecuadamente los diversos resultados obtenidos, se clasifica esta sección según cada uno de los criterios de evaluación establecidos.

2.4.1 Temperatura interna del recinto

Al evaluar la temperatura interna del recinto se demostró a través de la simulación desarrollada por Evola, et al. [5], que la simple implementación del PCM permite disminuir la temperatura interna en 0.5°C en el pico operativo, y en 1°C en las horas medias del día, cuando se usó paneles de PCM de parafina encapsulada en microesferas poliméricas en un edificio de oficinas en diferentes localidades de Europa. Por otro lado, los resultados de Auzaby, et al. [18], indican que si bien es cierto el uso de PCM no mantiene la temperatura interior en el valor deseado (25°C en UK), sí se nota que los picos de variación de la temperatura disminuyen, por lo que la temperatura interna de la casa se mantiene más cerca de la temperatura deseada que sin el uso de PCM. Un resultado similar halló Cao, et al. [20], quienes demostraron por medio de simulación con el método de diferencias finitas que la inclusión de PCM en una pared de hormigón reduce la variación de la temperatura interna, y que a medida que se aumenta la concentración del PCM en la pared, aumenta su capacidad de almacenamiento de energía, y por consiguiente, se reduce las fluctuaciones de la temperatura interna de la casa.

En China, el estudio desarrollado por Ling, et al. [26], demostró que la capacidad de los PCM de almacenar calor cuando una casa verde (greenhouse) aumentaba su temperatura, permitía el mejoramiento de la temperatura interna del aire. Un resultado similar se obtuvo del experimento desarrollado por Laaouatni, et al. [1], quienes al encender una resistencia eléctrica a un costado de una pared de bloques con PCM de mezcla de parafina y estireno polímero en sus cavidades, y evaluar las mediciones tomadas por los termopares, se observó que

a pesar de que la resistencia eléctrica alcanzara los 64°C a las 5 horas, del lado interno del bloque la temperatura máxima percibida era de solo 26°C, es decir, el PCM había absorbido gran parte de la energía en vez de dejarla pasar al recinto. A las dos horas y media de haber detenido el calentamiento, las temperaturas en todos los sensores habían caído y se estabilizaron alrededor de la temperatura de cambio de fase.

Resultados similares se hallaron por Li, et al. [14], quienes simularon una pared sin PCM (modelo 1) y una pared con PCM (modelo 2), para diferentes localidades (Harbin, Beijing, Shanghai y Guangzhou), y distintas estaciones. Encontraron que en temporada de invierno no había mayor diferencia en la temperatura interna del recinto entre los dos modelos, que en la temporada de transición se reducía la fluctuación de la temperatura en el modelo 2, y en la temporada de verano había un mejoramiento de esta temp

2.4.2 Ubicación del PCM

Evola, et al. [5], determinaron, en base a la Intensidad de incomodidad térmica (Intensity of Thermal Discomfort, ITD), que el uso de PCM en las paredes internas produce un mejor ambiente que su uso en el techo, y está relacionado con que las paredes tienen mayor área y están expuestas al Sol directamente más tiempo que el techo, y por tanto se explota el uso del PCM. El mismo resultado se obtuvo por Auzaby, et al. [18].

Un enfoque diferente fue llevado a cabo por Jahangir, et al. [22], donde se determinó que entre más cerca esté un panel de PCM al lado caliente de la pared mejor será su explotación. Esto se determina al observar que cuando el PCM se ubica más lejos del lado caliente de la pared se disminuye su capacidad para derretirse

debido a su alto punto de fusión. Un estudio similar fue llevado a cabo por Cao, et al. [21], donde se obtuvo resultados similares. Sin embargo, esta consideración debe ser tomada en cuenta dependiendo del PCM que se utilice.

2.4.3 Frecuencia de activación

Es un parámetro que refleja el tiempo durante el cual el PCM se encuentra cambiando de fase y puede ser utilizado como una medida de eficiencia del PCM. Este valor suele ser menor en países donde hay alta irradiación solar debido a que esta elevada intensidad acelera el

proceso de cambio de fase lo que produce un menor aprovechamiento [5]. Esto queda demostrado en el estudio de Evola, et al. [5], donde la Frecuencia de activación tiene valores de 96% en París (ciudad al norte de Europa), y 35% en Catania (ciudad al sur de Europa). Esto significa que, en las ciudades al norte del continente europeo, donde hay menor irradiación, el PCM se mantiene más tiempo cambiando de fase. El mismo resultado se obtuvo por Auzeby, et al. [18].

2.4.4 Espesor del PCM en paredes sándwich

Cao, et al. [21], desarrollaron una simulación donde se varía el espesor de un PCM utilizado como capa intermedia en una pared sándwich, y generaron una gráfica que muestra su impacto en el consumo energético. Se puede observar que al utilizar un mayor espesor de PCM se puede disminuir la energía de consumo, y a su vez aumentar la resistencia y la capacidad de almacenamiento de calor de la pared. Un resultado similar se obtuvo por Rahimpour, et al. [15].

2.4.5 Uso de ventilación

En el experimento de Laaouatni, et al. [1], donde se rellena las cavidades de una pared de bloque con PCM sol-gel y se colocan tubos para ventilación, se observa que la temperatura antes del tubo ventilado sube hasta 48°C y cae rápidamente a 30°C en 3 horas, y luego se estabiliza. a temperatura después del tubo ventilado sube únicamente hasta 27°C, es decir el PCM ni siquiera cambia de fase, lo que demuestra que el tubo ventilado ayuda en gran medida a la liberación de la energía.

2.4.6 Capacidad de explotación del PCM

En la simulación de Evola, et al. [5], se utilizó dos PCM con temperatura de fusión diferente, siendo el PCM con matriz de abeja y cera de parafina el de mayor temperatura de fusión. Se observa que este PCM con matriz de abeja y cera de parafina ofrece una reducción del 51% en la intensidad de incomodidad térmica (ITD), mientras que el PCM más ligero sólo logra una reducción del 29%. Esto es debido a que la simulación fue ejecutada para un periodo de verano en el que las temperaturas son más elevadas, por tanto, no es posible explotar la capacidad del PCM ligero. Esto refleja la importancia de la adecuada selección del PCM según la región climática del edificio.

2.4.7 Demanda energética para calefacción y refrigeración

De la simulación desarrollada por Arce, et al. [17], donde se compara un recinto sin PCM y otro con PCM se observa que la demanda de refrigeración disminuye cuando se emplea PCM, en todas las localidades estudiadas (Antártica, Letonia, Líbano, Mali y Turquía).

2.4.8 Comportamiento del PCM frente a materiales convencionales evaluando el flujo de calor máximo

Jahangir, et al. [22], compararon el comportamiento energético de un PCM de cera de parafina P56-58 frente al ladrillo, arena y aire, y encontraron que tanto el PCM, como el ladrillo tenían un mejor comportamiento energético que la arena y el aire. Su implementación es más apropiada para reducir las variaciones de temperatura. El flujo de calor general exhibe una tendencia similar a la reportada por Hasan, et al. [27], quienes determinaron que la integración de una capa de PCM reduce el flujo de calor máximo.

Por otro lado, Li, et al. [17], estudiaron el comportamiento de una pared de ladrillo, frente a una pared de ladrillo con una capa de PCM. Se encontró que la temperatura de la superficie interior de la pared con el PCM es menor que la temperatura de la superficie interior de la pared de referencia. De igual manera, se halló que el flujo de calor en la pared con PCM es menor que la pared de referencia.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Luego de realizada la revisión de la literatura, se lleva a cabo una evaluación de diferentes materiales de cambio de fase aplicados en la envolvente, a través de simulación dinámica. La simulación se realizó en el software DesignBuilder v6.1.6.011, para un edificio de oficinas (Figura 1) con área de piso de 400 m² y 3.5 m de alto. El estudio se realizó con la zona climática de Panamá [28], en donde el lugar específico para el análisis fue: Ciudad de Panamá (tipo de clima Awi acuerdo con la clasificación de Köppen). Según los datos meteorológicos de Solargis©, la zona de estudio tiene una temperatura promedio anual de 27.2 °C y una humedad relativa de 78%. Panamá tiene dos estaciones a lo largo del año: seca (enero a marzo) y lluviosa (abril a diciembre).

Las paredes están compuestas de varias capas (Tabla 1), donde la capa PCM hace referencia a la zona donde se ubica el PCM en estudio. La simulación fue llevada a cabo para cinco de los materiales de cambio de fase estudiados por los investigadores. Estos son: Cera

Parafina P56-58, RT21 (PCMC21), PCM1, Dupont Energain y BioPCM.

TABLA 1.
 Capas de la pared y periodo de tiempo utilizado en las simulaciones.

Capas de pared en las simulaciones ¹	
Material	Espesor (m)
0.75 in. Stucco o repello (Capa externa)	0.0190
XPS Extruded Polystyrene - CO2 Blowing	0.0897
PCM2	0.0742
Gypsum Plasterboard (Capa interna)	0.0130
Periodo de tiempo para las simulaciones	
23 de marzo-30 de marzo ³	
Notas: ¹ El orden de las capas de la pared es en forma descendente. ² En los cinco materiales de cambio de fase se utilizó el mismo espesor. ³ Se eligió este periodo ya que presenta mayores temperaturas en el exterior según los datos meteorológicos [1], [28].	

- ¹ El orden de las capas de la pared es en forma descendente.
- ² En los cinco materiales de cambio de fase se utilizó el mismo espesor.
- ³ Se eligió este periodo ya que presenta mayores temperaturas en el exterior según los datos meteorológicos [1],[28].

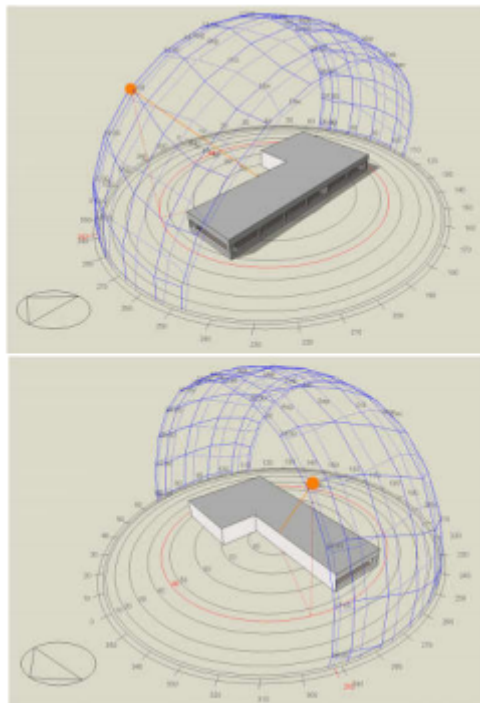


FIGURA 1.
 Edificio de oficina para evaluación: Vista frontal (arriba) y vista posterior (abajo).

Donde se evalúan diversos parámetros como las variaciones de la temperatura interna, la influencia del espesor del PCM y el ahorro en la carga energética por refrigeración (anual).

Es necesario decir, que los valores que presentan un rango se simularon con un valor promedio del rango

TABLA 2.
Resumen de data meteorológica típica usada para simulación.

Día crítico por mes	T _{máx} (°C) Hora	T _{mín} (°C) Hora	HR _{máx} (%) Hora	HR _{mín} (%) Hora	Velocidad de viento (m/s)	Dirección de viento (°)
Enero 3	35.0 15:00	23.9 6:00	94 5:00	44 15:00	0.43	126
Febrero 20	34.6 15:00	22.2 6:00	93 6:00	40 15:00	2.77	85.67
Marzo 17	35.6 15:00	24.9 6:00	73 6:00	36 16:00	2.3	49
Abril 11	35.3 15:00	24.8 6:00	82 00:00	44 16:00	1.75	87
Mayo 20	34.8 15:00	24.5 6:00	90 6:00	53 16:00	0.87	83.3
Junio 23	32.8 15:00	23.4 6:00	94 6:00	58 15:00	0.45	108.25
Julio 21	35.5 16:00	24.3 5:00	97 4:00	49 16:00	0.3	89.3
Agosto 19	34.7 15:00	24.1 6:00	95 5:00	52 15:00	3.9	188
Septiembre 1	32.5 15:00	23 6:00	98 00:00	60 15:00	2.1	83
Octubre 20	32.5 15:00	23 6:00	96 6:00	62 14:00	2.33	90.67
Noviembre 11	32.9 15:00	23.7 6:00	94 5:00	61 13:00	2.55	80
Diciembre 16	34.3 15:00	24.6 6:00	94 6:00	50 16:00	4.2	34.5

T: Temperatura, HR: Humedad relativa, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

expuesto. En la Tabla 2, se muestran las diferencias de temperatura de cambio de fase o temperatura de fusión para los materiales que serán analizados. En la misma se puede observar que la mayor temperatura de fusión es presentada por la cera parafina P56-58 (57°C), y la menor es del material de cambio de fase PCM1 con una temperatura de fusión de 22 °C.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se indicó anteriormente el criterio de evaluación más utilizado en los estudios analizados es el de la temperatura interior del recinto, y es el primer criterio de evaluación utilizado aquí.

Al analizar la pared del sur o la pared más larga durante dos días, se puede observar que los materiales de cambio de fase estudiados tienen variaciones en la temperatura de hasta 2.2°C (Figura 2(a)-(e)). Sin embargo, el material de cambio de fase PCM1 (Figura 2(d)), presenta una alta conservación de la temperatura

interior en el recinto a comparación de los materiales de cambio de fase RT21 (Figura 2(e)) y Dupont Energain (Figura 2(c)). Adicionalmente, se puede observar la temperatura externa en la figura 2(f), y determinar que en todos los casos la temperatura interna del recinto no superó las temperaturas exteriores durante el día. La Cera Parafina P56-58 tuvo un comportamiento similar al indicado por Jahangir, et al. [22], en algunas horas del día (7:00 a 12:00). Con ello se puede indicar que la Cera Parafina P56-58 puede mejorar la masa térmica de una forma eficiente, ya que puede mantener la temperatura interior del recinto hasta 3°C más baja que la temperatura exterior.

de cada escenario con cada diferente PCM y la exterior, de aproximadamente seis horas, excepto para el BioPCM con sólo cinco horas de desfase. Este comportamiento térmico comparable se puede explicar en base a sus propiedades térmicas (Tabla 2), donde cada PCM presentan valores similares de conductividad y capacidad

calorífica sensible (ρ_{cp}) y latente. El BioPCM

presentando valores menores de estas propiedades, resulta en un menor retardo de la penetración del calor hacia el interior. Por otro lado, diferencias significativas se observan en los valores de temperatura interior alcanzados.

Más en detalle, se puede observar un desfase temporal entre los valores máximos de las temperaturas interiores

TABLA 2
Propiedades de los materiales de cambio de fase evaluados.

PCM	Punto de fusión (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)		Cantidad de energía (kJ/kg)	Calor específico cp (J/kg K)	
			Cambio de f.	Sol. a Liq.		Sólido	Líquido
Cera Parafina P56-58	42-72	900	0.25		250	1840	--
RT21 (PCMC21)	21.08	825	0.20		148	3420	1170
PCM11	18-26	1300	0.25	0.5	178.5	1785	
PCM-Ca (PCM a base de calcio)	21.8	-	1.2401	0.64-0.82	155.5	Not. 3	
Dupont Energain	25	885	0.018		-	2500	
Parafina Octadecante C18	28	814	0.23		-	1625	
PEG/SiO ₂ (CPCM)	42.4	-	1.3476-1.5316		121.03	-	
PCM21	29-31	1430 (20°C) 1230 (40°C)	0.6		160	-	
GPC con % de PS-DVB/RT27 (MPCM)							
0 % de MPCM	--	2199	1.35		100	891	
2.6 % de MPCM	23.3	2057	1.13		100	960	
5.2 % de MPCM	25.3	1875	0.87		100	1062	
GPC con % de MF/PCM24 (MPCM)							
0 % de MF/PCM24	--	2199	1.35		154	891	
2.6 % de MF/PCM24	23	2023	1.02		154	982	
5.2 % de MF/PCM24	23.7	1875-1960	0.74		154	1125	
BioPCM	23	860	0.2		219	1620	
BioPCM Blanket M182/Q29	29	-	-		-	-	
PCM 60% de parafina	27.6	-	2.7		-	(4)	
PCM parafina microencapsulada	22.6	-	0.18-0.22		-	Not. 4	
BJUT (Parafina encapsulada en polietileno de alta densidad)	-	900	0.5		(5)	2900	
Cera Parafina y estireno polimero	28	-	-		245	-	

1 El nombre de los PCM no se encuentra en los artículos, sus propiedades son distintas [14],[17].

2 El GPC con la composición del MPCM fue utilizado en dos artículos, sin embargo, sus densidades difirieron [16],[18].

- 3 El cálculo del calor específico está dado por ecuaciones [23].
- 4 El calor específico es dado por una gráfica para ambos PCM [5].
- 5 La cantidad de energía se encuentra en una tabla dependiente de la temperatura [22].

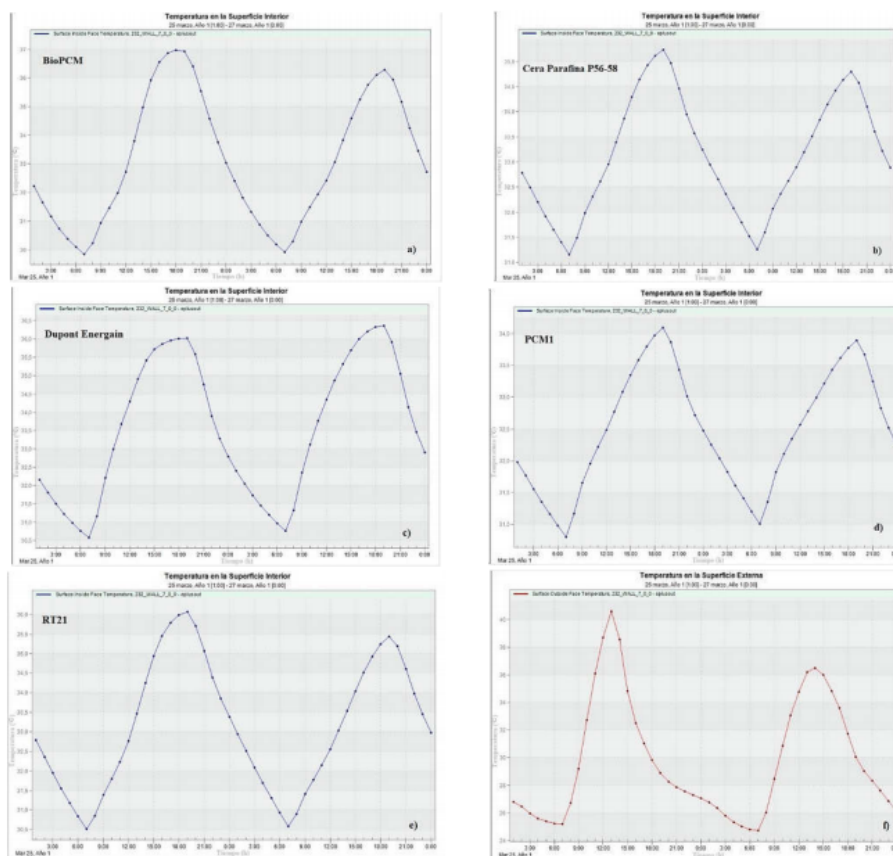


FIGURA 2. Temperaturas en el interior del recinto vs tiempo (líneas azules): a) BioPCM, b) Cera Parafina P56-58, c) Dupont Energain, d) PCM, e) RT21 f) Temperatura exterior del recinto vs tiempo.

Una comparación más profunda de estas diferencias encontradas se puede lograr mediante el monitoreo de la temperatura en la capa de cada PCM; sin embargo, las herramientas utilizadas aquí presentan esta limitante.

Al aumentar el espesor en los materiales de cambio de fase estudiados, se pudo observar que había variaciones mínimas en las temperaturas para los materiales Dupont Energain (Figura 2(b)) y Cera Parafina P56-58 (Figura

2(c)), las mismas se encontraban en un rango de 0.4 °C a 2°C en algunas regiones del recinto en estudio durante la semana establecida. Sin embargo, para el material de cambio de fase PCM1 (Figura 2(d)), hubo una disminución significativa en la temperatura. En el estudio realizado por Li, et al. [14], se indica que este material de cambio de fase puede mejorar la estabilidad térmica en la pared porque controla las fluctuaciones de temperatura

del aire interior en el recinto. También el material BioPCM (Figura 2(a)) presenta cambios significativos en la temperatura al aumentar el espesor, esto se reafirma en el estudio realizado por Fabrizio, et. al [29], el cual estudió las variaciones de temperatura y del espesor de los BioPCM y encontró que se reducía la demanda de refrigeración. Por otro lado, el material RT21 (Figura 2(e)) muestra un comportamiento inverso al aumentar su espesor. Cao, et al. [20], estudió variaciones de espesor en este material de cambio de fase y determinó que había una reducción en la energía en el clima de Oslo, Noruega; por lo que se puede decir que este efecto es adverso en climas tropicales húmedos.

Para evaluar el criterio de carga energética por refrigeración se tomaron las cargas anuales de los cinco PCM. En la Figura 3, se observa el consumo energético del edificio sin PCM en la línea verde superior. Se muestra que, para los materiales PCM1, Dupont Energain y RT21 se tiene un menor consumo en la carga de refrigeración respectivamente. En los meses de enero y diciembre se presenta una mayor demanda en el consumo, mientras que para los meses de febrero, marzo, junio, agosto, septiembre y noviembre se muestra lo contrario esto se debe a las horas de ocupación del edificio de estudio y a las condiciones climáticas.

Los resultados del consumo energético cuando se dobló el espesor de cada PCM se muestran en la figura 4. De aquí, se observa que el consumo energético disminuyó considerablemente teniendo una menor carga por refrigeración.

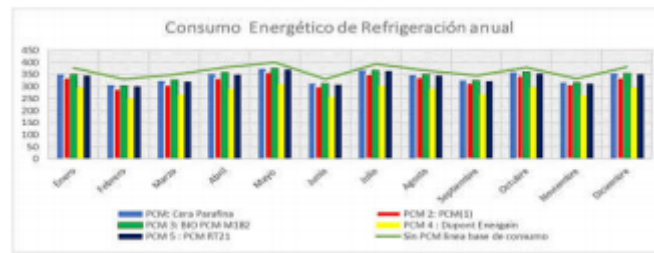


FIGURA 3. Consumo energético de refrigeración (kWh) de un Año para cada PCM.

Se hizo un análisis del ahorro energético anual para cada uno de los PCM estudiados, mediante los datos obtenidos de las figuras 3 y 4, y se evalúa el ahorro en el consumo energético de cada PCM con respecto al consumo energético sin los PCM. En la figura 5 se muestra el porcentaje promedio calculado del ahorro energético anual.

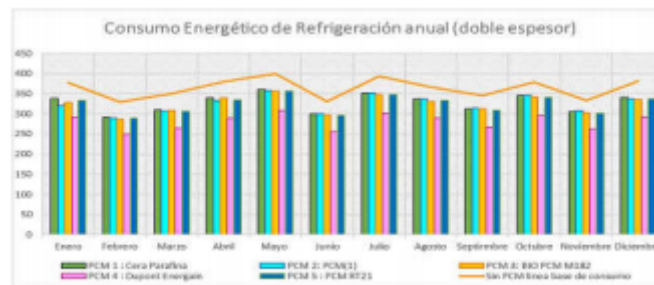


FIGURA 4. Consumo energético de refrigeración (kWh).

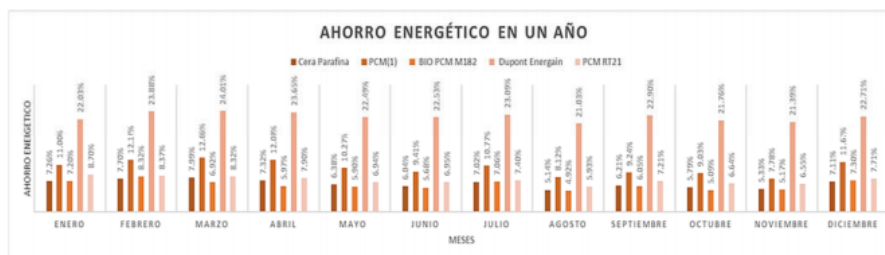


FIGURA 5. Porcentajes de ahorro energético en la carga de refrigeración de los PCM.

Como se puede observar en la figura 6, el PCM con mayor ahorro es el DuPont Energain con 22.62 % con respecto al consumo base del edificio sin PCM. Mientras

parafina con 6.61 %. Esto se debe a que su temperatura de cambio de fase es superior (57 °C) a la del clima de estudio por lo que se imposibilita que se produzca el

cambio de fase en este material. Otro que presentó menor ahorro fue el BIOPCM con 6.30 %.

Por otra parte, al realizar el análisis energético para el consumo de refrigeración doblándole el espesor (Figura

7 y 8) se obtuvieron mejorías en los resultados observando una disminución mucho mayor en el consumo con respecto al uso del PCM sin doblar el espesor.

Se puede observar en la figura 7, al doblarle el espesor a cada PCM se tiene un aumento significativo en la Cera Parafina, BIO PCM y el PCM RT21, con 9.93 %, 10.94

% y 11.05 % respectivamente. Mientras que el PCM 1

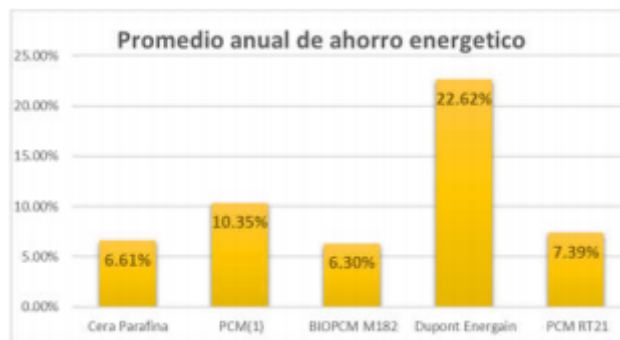


FIGURA 6.

Promedio anual de ahorro energético (kWh) de los distintos PCM.

(10.70 %) y el DuPont Energain (22.93 %) el porcentaje de ahorro no aumento mucho, esto se debe a que a algunos PCM les favorece esta condición mientras que a otros no, como se corroboró en otras investigaciones. Al realizar los dos análisis, se tiene que aplicando el doble del espesor a las capas de los PCM. El DuPont Energain obtuvo un (22.62 %) y (22.93 %) sin doblar el espesor y doblándolo, respectivamente. Este cumple con las condiciones climáticas seleccionadas y demostró un buen desempeño al ser evaluado por los indicadores de confort.

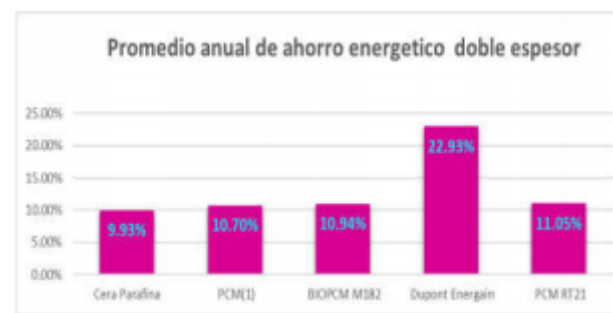


FIGURA 7.

Promedio anual de ahorro energético (kWh) de los distintos PCM al doblarle el espesor.



FIGURA 8.

Porcentajes de ahorro energético en la carga de refrigeración al doblarle el espesor.

Por último, la validación experimental de estos resultados permitiría verificar el modelo y criterios empleados en este estudio. Sin embargo, se pretende su implementación a escala real en un futuro, debido a las limitantes en adquisición de recursos.

5. CONCLUSIONES

Los materiales de cambio de fase han sido investigados por varios años para ser utilizados como un método pasivo para controlar la masa térmica de un recinto debido a su capacidad de almacenamiento de energía. Estos son distribuidos en forma de paneles,

encapsulados, microencapsulados o en forma de sol-gel. Los PCM más utilizados en las investigaciones son orgánicos, específicamente de parafina, mientras que los PCM inorgánicos se encuentran en proceso de diseño y evaluación. De aquí surge el objetivo de evaluar diferentes materiales de cambio de fase para determinar su influencia en la mejorar el confort interno de los edificios, y que no impacten negativamente al ambiente. Por lo cual, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- El software EnergyPlus es el más utilizado en investigaciones son llevadas a cabo a través de simulaciones, muchas veces por el alto costo de implementación de estudios experimentales.
- Los criterios de evaluación más estudiados son la temperatura interna del recinto, la ubicación del PCM y la frecuencia de activación.
 - La aplicación de PCM en diversos escenarios ha demostrado una reducción en la entrada de calor al recinto, una reducción en la temperatura interna del recinto, y una reducción en la demanda de refrigeración. Esto pudo ser corroborado con la simulación realizada. De igual forma se puede indicar que el comportamiento de los diferentes PCM se verán afectados con el clima del país donde se utilice, por lo cual, se debe tomar en cuenta el clima de la zona específica a utilizar para aprovechar la capacidad de almacenamiento de energía del PCM. Una comparación más profunda de estas reducciones y diferencias encontradas se puede lograr mediante el monitoreo de la temperatura en la capa de cada PCM; sin embargo, las herramientas utilizadas aquí presentan esta limitante.
 - En muchas condiciones entre mayor sea el espesor de un panel de PCM se logra un mayor control de la temperatura interna del recinto, pero este caso no es factible en algunos materiales de cambio de fase, como es el caso del RT21.
 - El material de cambio de fase el cual obtuvo un mayor ahorro energético fue el Dupont Energain con un 22.93%, debido a que su temperatura de cambio de fase es de 25°C, lo cual le permite realizar más ciclos completos. Por lo tanto, para climas cálidos este sería una buena opción para mitigar la demanda energética

Se sugiere para próximas investigaciones evaluar el comportamiento energético de un edificio y los costos al utilizar materiales de cambio de fase junto a otras técnicas pasivas para el control de la masa térmica, para determinar si esta combinación ofrece un verdadero ahorro energético, y definir si es viable asumir los costos de construcción de los PCM, o si las otras estrategias pasivas ofrecen suficiente ahorro energético y no es necesario invertir en la implementación de PCM. De igual forma, se recomienda utilizar materiales de cambio de fase que presenten temperatura de fusión no tan altas, ni tan bajas para un clima tropical húmedo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Universidad Tecnológica de Panamá y de la Facultad de Ingeniería Mecánica, así como del grupo de investigación en Energía y Confort en Edificios Bioclimáticos (ECEB) <https://eceb.utp.ac.pa/>. Esta investigación forma parte del proyecto FID18-056, de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT). Se extiende el agradecimiento al Sistema Nacional de Investigación (SNI).

REFERENCIAS

- [1] R. B. M. E.-O. y M. E.-G. A. Laaouatni N. Martaj, “Phase change materials for improving the building thermal inertia.”
- [2] M. Song, F. Niu, N. Mao, Y. Hu, and S. Deng, “Review on building energy performance improvement using phase change materials,” *Energy Build.*, vol. 158, pp. 776–793, 2018.
- [3] EIA, “International Energy Outlook 2017 Overview,” vol. 143.
- [4] C. U. I. QI, “Office building energy saving potential in {Singapore},” 2006.
- [5] G. Evola and L. Marletta, “The Effectiveness of {PCM} Wallboards for the Energy Refurbishment of Lightweight Buildings,” vol. 62, pp. 13–21.
- [6] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, “Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review,” vol. 15, no. 2, pp. 1373–1391.
- [7] V. D. Cao et al., “Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications,” vol. 133, pp. 56–66.
- [8] S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan, and J. Wilson, “Thermal Energy Storage Enhancement of Lightweight Cement Mortars with the Application of Phase Change Materials,” vol. 180, pp. 1170–1177.
- [9] S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan, and J. Wilson, “Assessing the feasibility of integrating form-stable phase change material composites with cementitious composites and prevention of {PCM} leakage,” vol. 192, pp. 88–91.
- [10] A. M. Borreguero, I. Garrido, J. L. Valverde, J. F. Rodríguez, and M. Carmona, “Development of smart gypsum composites by incorporating thermoregulating microcapsules,” vol. 76, pp. 631–639.
- [11] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, and D. Quenard, “Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material,” vol. 38, no. 6, pp. 673–681.
- [12] E. M. Alawadhi, “Thermal analysis of a building brick containing phase change material,” vol. 40, no. 3, pp. 351–357.
- [13] » [En línea]. Disponible: <https://energyplus.net/>.
- [14] Y. Li, Y. Wang, X. Meng, M. Wang, and E. Long, “Research on Indoor Thermal Environment Improvement of Lightweight Building Integrated with Phase Change Material under Different Climate Conditions,” vol. 121, pp. 1628–1634.
- [15] Z. Rahimpour, A. Faccani, D. Azuatalam, A. Chapman, and G. Verbič, “Using Thermal Inertia of Buildings with Phase Change Material for Demand Response,” vol. 121, pp. 102–109.
- [16] W. I. W. M. Nazi, Y. Wang, H. Chen, X. Zhang, and A. Paul Roskilly, “Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate,” vol. 142, pp. 2295–2302.
- [17] M. E. A. Fariña, L. F. Garrido, F. M. T. Pastoriza, A. S. García, and G. M. Liroa, “Análisis de consumos energéticos de aislantes tradicionales y materiales de cambio de fase aplicados a contenedores marítimos para despliegues militares,” vol. 94, no. 6, pp. 626–631.
- [18] M. Auzeby et al., “Using Phase Change Materials to Reduce Overheating Issues in {UK} Residential Buildings,” vol. 105, pp. 4072–4077.

- [19] DESIGNBUILDER, “{DesignBuilder} website.” 2016.
- [20] V. D. Cao et al., “Thermal analysis of geopolymer concrete walls containing microencapsulated phase change materials for building applications,” vol. 178, pp. 295–307.
- [21] V. D. Cao, T. Q. Bui, and A.-L. Kjøniksen, “Thermal analysis of multi-layer walls containing geopolymer concrete and phase change materials for building applications,” vol. 186, p. 115792.
- [22] A. Laaouatni, N. Martaj, R. Bennacer, M. El Omari, and M. El Ganaoui, “Phase change materials for improving the building thermal inertia,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 744–749, 2017.
- [23] R. J. Khan, M. Z. H. Bhuiyan, and D. H. Ahmed, “Investigation of heat transfer of a building wall in the presence of phase change material ({PCM}),” vol. 1, no. 2, pp. 199–206.
- [24] Y. Li, W. Liang, J. Zhou, and E. Long, “Experimental Study on Thermal Performance Improvement of Building Envelopes Integrated with Phase Change Materials in an Air-conditioned Room,” vol. 205, pp. 190–197.
- [25] “EnergyPlus.” .
- [26] L. Guo, X. Yu, D. Gao, Y. Guo, C. Ma, and T. Deng, “Synthesis and thermal energy storage properties of a calcium-based room temperature phase change material for energy storage,” vol. 135, pp. 1–7.
- [27] J. Yang, J. Zhou, Z. Nie, and L. Liu, “Preparation and Property Analysis of Phase Change Concrete {PEG}/{SiO}2-{CPCM},” vol. 29, pp. 21–26.
- [28] H. Ling et al., “Effect of phase change materials on indoor thermal environment under different weather conditions and over a long time,” vol. 140, pp. 329–337.
- [29] M. Hasan, S. Alam, and D. H. Ahmed, “Effect of phase change material on the heat transfer rate of different building materials,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1919, no. 1, p. 20029, 2017.
- [30] ETESA, “Hidromet.” 2009.
- [31] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F. de’ Rossi, and G. P. Vanoli, “Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: {Energy} savings and indoor comfort in the cooling season,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 990– 1007, 2014.