

# Simulación dinámica de un edificio con una doble capa de PCM en el techo para un clima semiárido.

J.A. Contreras-Aguilar<sup>1</sup>, M. Gijón-Rivera<sup>2</sup>, C.I. Rivera-Solorio<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, México. Email: albertocontreras.120@gmail.com

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, México. Email: miguel.gijon@tec.mx

<sup>3</sup>Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, México Email: rivera.carlos@tec.mx

## Resumen

Se presenta una evaluación energética anual de un prototipo de edificio que utiliza una doble capa de Material de Cambio de Fase (PCM) en el techo. La edificación se simuló con el software de simulación de energía en edificios DesignBuilder. Se evaluó el consumo anual de energía del edificio con la doble capa de PCM en el techo bajo condiciones climáticas semiáridas de la ciudad de Monterrey en México. Los resultados comparan el caso base con techo de concreto convencional versus la incorporación de una doble capa de PCM al interior del techo de concreto. Los resultados mostraron un ahorro energético anual de 1,858.44 kWh/año, lo que representa una reducción del 7.8% respecto al caso base. El retorno de la inversión es de hasta 6.7 años con una tasa interna de retorno del 14.4%. El ahorro de emisiones es de 808.42 kgCO<sub>2</sub>eq/año.

**Palabras clave:** edificios; material de cambio de fase (PCM); doble capa; clima semiárido; análisis energético.

## Abstract

An annual energy assessment of a building prototype with a double-layered phase change material (PCM) into the roof system is presented. The building was thermally modeled through the building energy simulation software DesignBuilder. The annual energy consumption of the building with a double-layered PCM roof was assessed under the semiarid climatic conditions of the Monterrey city in Mexico. The results compare the base case with the PCM roof configuration. The results showed that the energy saved was 1,858.44 kWh per year, which represents a reduction of 7.8%. The return on investment could be up to 6.7 years and the internal rate of return to 14.4%. The emissions savings were 808.42 kgCO<sub>2</sub>eq per year.

**Keywords:** Buildings; phase change material (PCM); double layer; semiarid climate; energy analysis.

## 1. Introducción

El sector de las edificaciones tiene una gran demanda de energía a nivel mundial, representando alrededor del 30% del consumo energético total y contribuyendo con el 27% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el planeta [1]. Adicionalmente, el consumo energético debido al uso de sistemas de aire acondicionado, calefacción y ventilación en edificios a nivel mundial representa alrededor de 47% del consumo total de energía [2]. Mientras en México, la demanda de energía del sector de las edificaciones representa un consumo del 18% del consumo total [3]. Por otro lado, los usuarios de edificios ocupan los espacios interiores en aproximadamente un 80-90% de su tiempo, lo que implica necesidades imperantes de

confort térmico interior para mejorar su calidad de vida y productividad [4]. Tan solo en México, el 30% la energía usada por las edificaciones es debido a aplicaciones de confort térmico interior [5], con mayores necesidades en el uso de sistemas de aire acondicionado en los Estados del norte del país [6].

Por este motivo, se han implementado diversas estrategias pasivas de diseño para aumentar la eficiencia energética de los edificios y reducir la demanda energética relacionada con el confort [7-8]. Estas técnicas de diseño constructivo aprovechan el recurso solar o del viento para mejorar las condiciones de confort al interior sin la necesidad de energía eléctrica adicional o sistemas mecánicos/electromecánicos de climatización. El

particular para clima cálidos, estas técnicas pasivas se pueden concentrar en la envolvente a través de su adecuada orientación solar, técnicas de ventilación pasiva, el uso de aislantes, sistemas de protección solar, recubrimientos reflectivos, sistemas evaporativos y el uso de materiales de almacenamiento latente. En este sentido, el techo de una edificación es el elemento de la envolvente que más cantidad de radiación solar recibe durante el día, por lo que mejorar el rendimiento térmico del techo es importante para reducir las ganancias de calor al interior del edificio. Algunas de las estrategias pasivas de diseño aplicadas al techo son: reducir la absorptividad solar mediante la aplicación de materiales reflectantes, mejorar la resistencia térmica con materiales aislantes y aumentar la masa térmica reduciendo las oscilaciones térmicas interiores utilizando materiales de cambio de fase (PCM) [9].

El PCM tiene almacenamiento de energía térmica sensible (cambio de temperatura) y latente (cambio de fase), siendo ésta la que mayor impacto tiene porque absorbe o libera más órdenes de magnitud que cualquier otro tipo de material durante la transición de cambio de fase [10-13]. Los PCM pueden clasificarse según su constitución (orgánica, inorgánica o eutéctica) y su método de incorporación (microencapsulación, macro encapsulación, estabilización de forma o una combinación) [12-17]. En el mercado existen diferentes marcas comercialmente disponibles, sin embargo, la parafina y las sales hidratadas son los más utilizados para la envolvente de edificios [14-16]. El PCM se derrite al absorber el calor proveniente del exterior, permitiendo que la temperatura interior se estabilice; cuando la temperatura exterior disminuye, el PCM libera la energía previamente almacenada, evitando que la temperatura interior disminuya excesivamente [15]. Por lo anterior, el PCM ayuda a reducir el consumo de energía en los sistemas HVAC, ofrece control de temperatura interior y retrasa el pico de demanda de energía de calefacción y enfriamiento [18].

En la literatura se ha reportado que el tener una sola capa de material de cambio de fase (PCM) en paredes o techos, no ha sido la mejor opción en evaluaciones anuales, ya que se presenta una incompatibilidad entre la temperatura de fusión del material y los efectos estacionales de algunos climas con variedad climática a lo largo del año. Por ejemplo, Khadir et al. [19] reportó una dependencia estacional del comportamiento del PCM de una sola capa son reducciones en la transferencia de calor entre el 25 y el 47% con una sola capa, pero con bastos espesores de PCM de entre 10 y 30 cm. Para el caso de estudios que han aplicado múltiples capas de PCM, Panchal et al. [20] han reportado un estudio donde concluyen que una configuración de doble capa de PCM puede mitigar el efecto estacional y mejorar la eficiencia en la

aplicación del PCM en envolventes. También, Pasupathy y Velraj [21] evaluaron el efecto de una doble capa de PCM en un techo de un edificio para una evaluación anual y encuentran que esta configuración obtiene un espacio térmicamente más confortable. Así mismo, Rehman et al. [22] proponen una configuración de doble capa para ladrillos en climas cálidos y fríos, y encuentran una buena respuesta térmica en el verano y el invierno para reducir la temperatura interior de un edificio en Islamabad. Finalmente, Gao et al. [23] proponen también una configuración de PCM para mejorar las condiciones de la envolvente y adecuarla térmicamente a lo largo de una evaluación anual. Los autores encuentran que el PCM doble es capaz de satisfacer la demanda de energía en verano e invierno, sin embargo, no mostró un comportamiento óptimo en varios meses. El PCM doble incrementó el retardo térmico en 4.6 h en promedio en verano e invierno. Debido a lo discutido en el estado del arte, este estudio propone una evaluación energética anual de una edificación residencial mexicana con un techo con una capa doble de PCM ubicada un clima con cambios bruscos entre invierno y verano en Monterrey México. Se propone una comparación entre una configuración convencional de techo de concreto y el techo con doble PCM inorgánico y comercialmente disponible para observar sus ventajas en la adaptación térmica anual, el ahorro de energía y el confort térmico interior del edificio.

## 2. Metodología

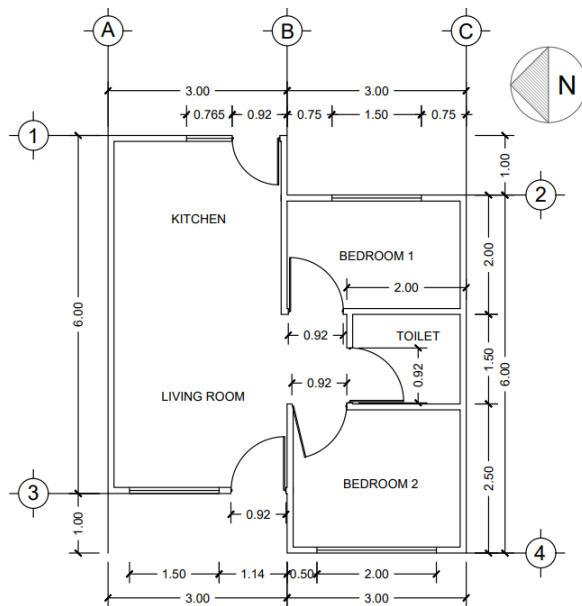
### 2.1. Datos de clima

La ciudad de Monterrey, capital del estado de Nuevo León en México fue seleccionada debido a la importancia de la ciudad en el país, su consumo de energía para aire acondicionado y sus condiciones climáticas extremas. El Estado se ubicó en el tercer lugar en términos de producto interno bruto en 2022 y es el segundo en términos de consumo de energía anual con propósitos de enfriamiento, teniendo un gran potencial para para el estudio de la aplicación del PCM en el techo de los edificios. La ciudad de Monterrey (25.65°N, -100.29°W) se ubica en el noroeste del país a una altitud de 534 msnm; el clima que prevalece es semiárido (Köppen BS). Los datos del clima fueron obtenidos de la base de datos de DesignBuilder en términos de radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad y dirección del viento.

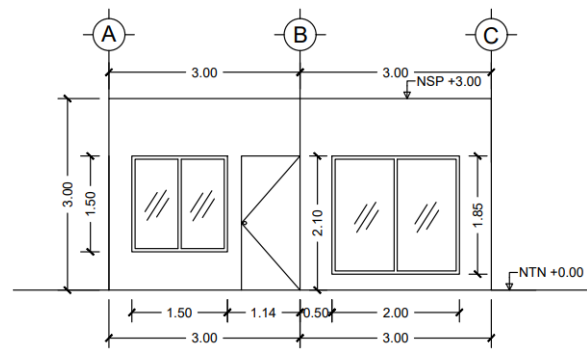
### 2.2. Modelo Físico

La geometría del edificio a modelar consiste en un piso con la fachada principal orientada al oeste, tiene dimensiones en planta de 6.0 x 6.0 m con una asimetría y una altura de 3.0 m desde el suelo. La Fig. 1, 2 y 3 representan el plano en planta, fachada oeste y este

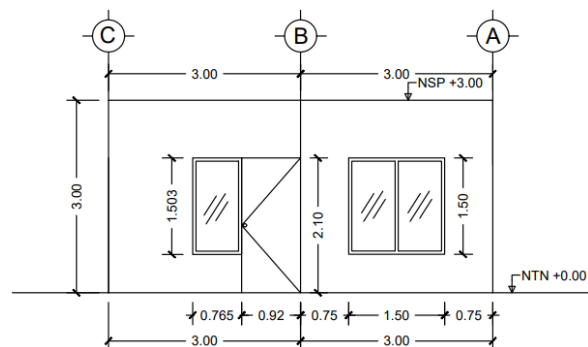
respectivamente con las dimensiones y ubicación de cada uno de los elementos de la envolvente.



**Figura 1.** Plano de planta edificio (medidas en m).



**Figura 2.** Plano de Fachada Oeste.



**Figura 3.** Plano de Fachada Este

**Tabla 1.** Propiedades térmicas de los materiales.

Componente	Material	Espesor [m]	Absortancia [-]	Absortancia solar [-]	Conductividad [W/m-K]
<b>Techo sin PCM</b>					
Exterior	Cast Concrete	0.200	0.90	0.60	1.13
Interior	Plaster (Dense)	0.013	0.90	0.50	0.50
<b>Techo con PCM</b>					
Exterior	Cast Concrete	0.200	0.90	0.60	1.13
Capa 2	PCM 25	0.006	-	-	0.54 (Líquido) 1.09 (Sólido)
Capa 3	PCM 29	0.012	-	-	0.54 (Líquido) 1.09 (Sólido)
Interior	Plaster (Dense)	0.013	0.90	0.50	0.50
<b>Piso</b>					
Exterior	Cast Concrete	0.200	0.90	0.60	1.13
Capa 2	Floor/Roof Screed	0.070	0.90	0.73	0.41
Interior	Ceramic Tiles Dry	0.030	0.90	0.60	1.20
<b>Muros exteriores</b>					
Exterior	Plaster (Lightweight)	0.013	0.90	0.50	0.16
Capa 2	Brickwork Outer	0.100	0.90	0.70	0.84
Interior	Plaster (Lightweight)	0.013	0.90	0.50	0.16
<b>Muros interiores</b>					
Exterior	Plaster (Lightweight)	0.013	0.90	0.50	0.16
Capa 2	Brickwork Outer	0.100	0.90	0.70	0.84
Interior	Plaster (Lightweight)	0.013	0.90	0.50	0.16
<b>Ventana</b>					
Marco	Aluminum (no break)	0.040	0.30	0.30	160.00
Vidrio	Sgl Blue 6mm	0.006	-	-	-

Los materiales aplicados en la envolvente del edificio son los mismos que se utilizaron en investigaciones previas de confort térmico en edificios en México [9]. Las propiedades térmicas de los materiales son presentadas en la Tabla 1 indicando la capa de material, ubicación y propiedades.

El análisis consiste en realizar una simulación numérica transitoria considerando un sistema básico de HVAC en el edificio. Las características generales y del sistema se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características generales edificio.

Característica	Descripción
Absortancia	0.6 for roof / 0.5 for wall
Ocupación	3 personas
Infiltración	0.5 CAH
Sistema HVAC	Paquete DX
Setpoint	24°C
COP	2.5
Operación HVAC	Entre semana: 00:00 a 06:00, 0.5;
	06:00 a 18:00, 1.0; 18:00 a 24:00, 0.5.
	Fin de semana: 00:00 a 24:00, 1.0.

### 2.3. Método empleado

Se utilizó el software DesignBuilder para el análisis energético, la geometría se modeló con el módulo integrado; el modelo numérico es resuelto utilizando la simulación dinámica de energía de edificios Energy Plus v8.1. La simulación es horaria transitoria con un periodo del 1 de enero al 31 de diciembre. Para modelar y resolver la fusión y solidificación del PCM se activó el módulo Material de Cambio de Fase, considerando el modo Histéresis y el algoritmo de solución de Diferencias Finitas.

Las consideraciones para la simulación son: 1) Las propiedades del concreto permanecen constantes; 2) Las propiedades del PCM son constantes, excepto el coeficiente de conductividad térmica que es diferente únicamente para la fase líquida y sólida; 4) El sistema HVAC es paquete unidad DX; 5) Se asume una ocupación de 3 personas y una temperatura de confort de 24°C; 5) El edificio fue seleccionado con base en estudios previos [15] de clasificación de vivienda mexicana; 6) La doble capa de PCM es de 12 mm con una temperatura de fusión de 29°C y 6 mm con 25°C, basado en un análisis previo de CFD.

## 3. Resultados

### 3.1. Validación

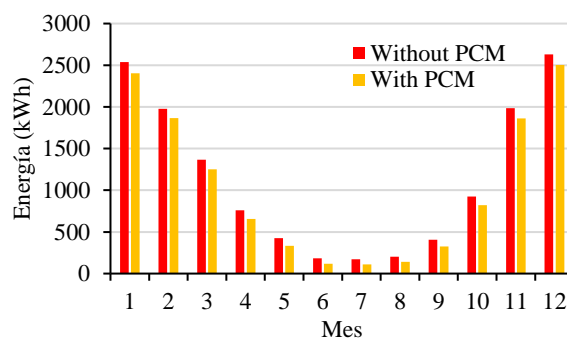
Se utilizó BESTEST para corroborar la precisión del software a utilizar, debido a que, este estándar es utilizado para evaluar los programas de análisis de energía en edificios. El caso Benchmark 600 FF del

ANSI/ASHRAE 140-2021 fue replicado utilizando DesignBuilder para comparar y reportar el porcentaje de error para la temperatura máxima, mínima y promedio del aire interior. El modelo es considerado como una sola zona térmica, se obtuvo una temperatura promedio al año de 26.1°C representado un error menor al 1%; de igual forma, la temperatura máxima y mínima obtenida en el año tiene un error menor al 1% comparándola con el caso Benchmark.

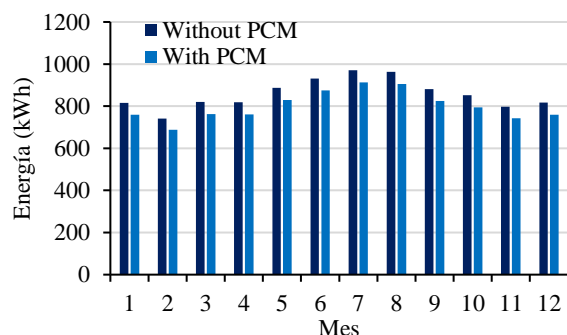
### 3.2. Resultados

La Figura 4 representa la energía que consumió el sistema HVAC para calentar el edificio y lograr alcanzar temperatura interior de 24°C con y sin el PCM en el techo. Se puede observar que todos los meses el consumo de energía debido a la calefacción del edificio se reduce utilizando el PCM. Los meses con mayor consumo de energía para calefacción coinciden con el periodo de invierno de la ciudad; por el otro lado, los meses que menos energía para calefacción consumen son los correspondientes al periodo de verano.

El mes que presenta la mayor de reducción de energía debido a calefacción al aplicar la configuración de PCM en el techo es el mes de enero. La energía es reducida de 2535.9 a 2403.9 kWh, obteniendo una diferencia de 132 kWh, lo cual representa una reducción del 5.2%.



**Figura 4.** Consumo de energía para calefacción por mes.



**Figura 5.** Consumo de energía para enfriamiento por mes.

En la Figura 5 se puede observar cuál fue el consumo de energía para enfriar el edificio y lograr la

temperatura de setpoint de 24°C con y sin el PCM integrado en el techo. Se aprecia que, de igual forma, el consumo de energía se reduce todos los meses aplicando el PCM. Además, los meses de mayor consumo de energía debido a enfriamiento se invierte, siendo el verano el periodo con mayor consumo de energía y el invierno el menor.

La Figura 6 compara el consumo energético anual debido a enfriamiento y calefacción con y sin la aplicación de la configuración del PCM. La mayor reducción de energía anual es debido a la calefacción con una reducción del 8.7%. La reducción de energía debida a enfriamiento es equivalente al 6.6%.

Finalmente, el sistema HVAC del edificio consume de manera global 23,864.59 kWh sin el PCM y 22,006.15 kWh aplicando el PCM en el techo. Esto representa una reducción total de energía debido al sistema HVAC de 1,858.44 kWh equivalente al 7.8%.

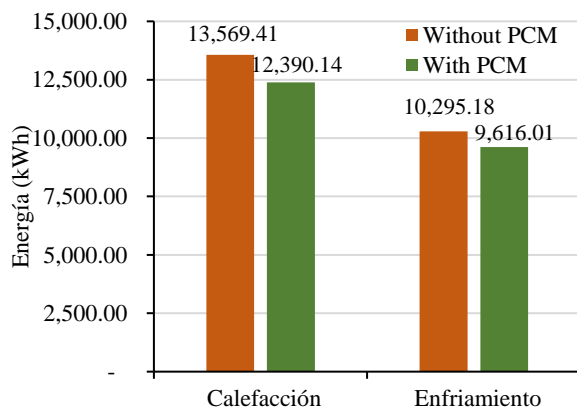


Figura 6. Consumo de energía anual para calefacción y enfriamiento.

### 3.3. Análisis económico y ambiental

El costo del PCM de la marca Infinite-R es de \$30 USD/m<sup>2</sup> para una capa de 6 mm del material si el volumen de compra es de 1 kilogramo. Sin embargo, el costo del material puede bajar hasta \$18 USD/m<sup>2</sup> si la compra se realiza por más de una tonelada. Este costo considera el material, importación, transporte y costo de instalación. El área del techo de este edificio es de 36 m<sup>2</sup>. Sin embargo, este valor es multiplicado por 3 debido a que el modelo considera una capa de PCM de 25°C y dos capas de 29°C, resultando en un área total del 108.0 m<sup>2</sup> de PCM para el edificio. Además, se considera que el periodo de vida del PCM es de 25 años, y se asume que el rendimiento energético permanece constante en este periodo [79].

El SPP si solo se compra un kilogramo de PCM es de 11.18 años con un IRR de 7.5%. Sin embargo, como se presenta en la Figura 7, si el material se compra en

mayoreo por más de una tonelada, el SPB se reduce a 6.71 años con un IRR de 14.4%.

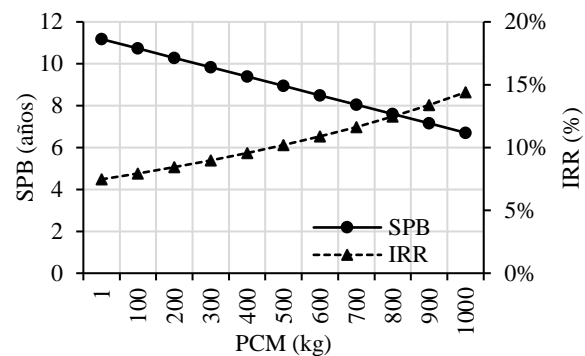


Figura 7. SPP e IRR por cantidad de PCM comprado.

De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por cada kilowatt hora de electricidad consumida, se emiten 0.435 kg de CO<sub>2</sub>. Debido a lo anterior, las emisiones de CO<sub>2</sub> mitigadas por la configuración del PCM en el techo es igual a 808.42 kgCO<sub>2</sub>eq para este tipo de edificio ubicado en la ciudad de Monterrey en México.

### 4. Conclusiones

Después de analizar los resultados obtenidos de la simulación dinámica de la utilización de una doble capa de PCM aplicada en el techo de un edificio en la ciudad de Monterrey, se pueden realizar las siguientes conclusiones respecto al consumo de energía, análisis económico y ambiental:

- El consumo de energía del sistema de HVAC para calefacción es mayor durante los meses de noviembre a febrero. Por otra, la energía consumida para enfriamiento es mayor para los meses junio a agosto. Estos meses corresponden a los meses más fríos y cálidos del año respectivamente para Monterrey.
- La cantidad de energía para calefacción al integrar la doble capa de PCM en el techo se reduce en un 8.7%, mientras que para enfriamiento se reduce un 6.6%. El consumo de energía total ahorrada en el sistema HVAC es de 1,858.44 kWh, representando una reducción del 7.8% durante el año.
- Si el PCM se compra a menoreo, la inversión en el material tiene un retorno de 11.18 años debido al ahorro de energía, y la tasa de retorno es del 7.5%. Sin embargo, si el material se compra al mayoreo, la inversión se retornaría en 6.71 años con una tasa de retorno del 14.4%, siendo esta configuración de PCM muy atractiva económicamente.
- Las emisiones se reducen 808.42 kgCO<sub>2</sub>eq al año. Si una mayor cantidad de edificios incluyen PCM en el

techo, la cantidad de emisiones a la atmósfera podrían generar un mayor impacto en la contaminación de la ciudad de Monterrey.

## 5. Referencias

- [1] IEA, <https://www.iea.org/reports/buildings>, último acceso 10/11/23
- [2] Kreider, J. Curtis, P.: Heating and cooling of buildings: Design for efficiency. 2nd edn. Taylor & Francis, USA (2010).
- [3] SENER, <https://www.cenace.gob.mx/Paginas/Info/MarcoRegulatorio.aspx>, último acceso 10/11/2023
- [4] Liu, F. et al: A review on indoor green plants employed to improve indoor environment. *Journal of Building Engineering* 53, 104542 (2022).
- [5] CONUEE, <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuadernoNo.10.pdf>, último acceso 10/11/23
- [6] USAID, <https://mexico-cooling.lbl.gov/wp-content/uploads/sites/38/2019/09/mexico-cooling-fact-book.pdf>, último acceso 10/11/23
- [7] Rodriguez, C. et al: Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. *Energy and Buildings*, 83, 10-22 (2014).
- [8] IEA, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/Net-Zero-by-2050-A-Roadmap-for-the-Global-Energy-Sector-CORR.pdf>, último acceso 10/11/2023.
- [9] Mousavi, S.: Energy, comfort, and environmental assessment of passive techniques integrated into low-energy residential buildings in semi-arid climate. *Energy and Buildings*, 263, 112053. (2022).
- [10] Oró, E. et al: Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, Pages 513-533, (2012).
- [11] Hasan, Z. et al: Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: A review. *Journal of Energy Storage*, 64, 107156, (2023).
- [12] Muhammad, F. et al: Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications. *Energy & Buildings*, 252, 111443, (2021).
- [13] Alotman, A. et al: A phase change material for building applications - A critical review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1858-1864, (2022).
- [14] Madessa, B et al: A Review of the Performance of Buildings Integrated with Phase Change Material: Opportunities for Application in Cold Climate. *Energy Procedia*, 62, 318-328, (2014).
- [15] Kosny J.: PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. United Kingdom: Springer, (2015).
- [16] Lamrani, B. et al: Phase change materials integrated into building walls: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110751, (2021).
- [17] Wang, X. et al: A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. *Energy and Buildings*, 260, 111923, (2022).
- [18] Cabeza, L. et al: A. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1675-1695, (2011).
- [19] A.I. Khdaif, G.A. Rumman, M. Basha, Developing building enhanced with PCM to reduce energy consumption, *J. Build. Eng.* 48 (2022), 103923.
- [20] J.M. Panchal, K.V. Modi, V.J. Patel, Development in multiple-phase change materials cascaded low-grade thermal energy storage applications: a review, *Clean. Eng. Technol.* 8 (2022), 100465.
- [21] A. Pasupathy, et al: Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, *Energy Build.* 40 (2008) 193–203.
- [22] Rehman, S.R. et al: Numerical simulation of a novel dual layered phase change material Brick Wall for human comfort in hot and cold climatic conditions, *Energies* 14 (2021) 4032.
- [23] Gao, Y. et al: Employing the double-PCM (Phase Change Material) layer to improve the seasonal adaptation of building walls: A comparative studies, *Journal of Energy Storage* 66 (2023) 107404.
- [24] M.E. Valencia, M. et al: Energy, economic, and environmental assessment of the integration of phase change materials and hybrid concentrated photovoltaic thermal collectors for reduced energy consumption of a school sports center. *Energy and Buildings*, 293, 113198, (2023).