

CLIMATIZACIÓN PASIVA DE VIVIENDAS CON COMPUESTOS PCM

Por Nelly Sarai Ramos Reyes^{1*}, Dr. C. Francisco Antonio Horta Rangel^{2*}, Dr. C. Arnaldo González Arias^{3**}

^{1*}Universidad de Guanajuato

Investigadora independiente

^{2*}Universidad de Guanajuato

<https://orcid.org/0000-0002-0939-2317>

^{2**}Universidad de La Habana

<https://orcid.org/0000-0003-3530-1156>

E-mail: agonzalezarias@gmail.com, arnaldo@fisica.uh.cu

Resumen

En años recientes han surgido diversos sistemas de *climatización pasiva* que no consumen energía; se basan en el uso de materiales PCM (del inglés *Phase Change Materials*), los cuales poseen una transición de fase con un valor notable del calor latente de fusión a la temperatura que se desea controlar. Se presentó una descripción del comportamiento de estos materiales durante el calentamiento y enfriamiento, así como los compuestos y técnicas más utilizados con este fin en la actualidad, a partir de una revisión documental. Se concluye que, además de los parámetros termodinámicos fundamentales del PCM utilizado, constituyen parámetros importantes a tomar en cuenta: sus propiedades mecánicas, la conductividad térmica del sistema seleccionado, la variación promedio de temperatura ambiente en el lugar que se desea climatizar y la selección de una geometría acorde con las particularidades del recinto donde se desee instalar este tipo de climatización.

Palabras clave: abonos verdes, asociación de cultivos, técnicas nucleares.

PASSIVE COOLING IN BUILDINGS WITH PCM COMPOUNDS

Abstract

In recent years, several passive air conditioning systems that do not consume energy have emerged; they are based on the use of PCM materials (Phase Change Materials), which have a phase transition with a significant value of the latent heat of fusion at the temperature to be controlled. A description of the behavior of these materials during heating and cooling was presented, as well as the most commonly used compounds and techniques for this purpose at present, based on a documentary review. It is concluded that, in addition to the fundamental thermodynamic parameters of the PCM used, the following are important parameters to take into account: its mechanical properties, the thermal conductivity of the selected system, the average variation of ambient temperature in the place to be air-conditioned and the selection of a geometry in accordance with the particularities of the enclosure where this type of air-conditioning system is to be installed.

Keywords: air conditioning, PCM material, latent heat, specific heat, buildings.

I. Introducción

En años recientes han surgido diversos sistemas de climatización pasiva para regular la temperatura de las viviendas que no consumen energía y se basan en el uso de materiales PCM (del inglés *Phase Change Material*), compuestos que poseen una transición de fase con un valor notable del calor de cambio de fase (o calor latente de fusión) a la temperatura que se desea controlar. Un PCM entrega calor durante la solidificación, cuando hace frío a su alrededor y absorbe calor al fundirse cuando la temperatura aumenta (figura 1).

Como la climatización mediante refrigeración puede llegar a ser prohibitiva en algunos lugares en que se concentra gran cantidad de personas, se ha considerado la climatización pasiva en aulas, oficinas o talleres para paliar los perjuicios ocasionados por el exceso de calor; aunque también se han estudiado sistemas que combinan climatización convencional con PCM para reducir los gastos (Kuta *et al.*, 2017).

Resultan esclarecedores los siguientes datos: el cuerpo humano en reposo genera un calor de 100-120 W, valor que se duplica cuando las personas realizan alguna actividad mínima como, por ejemplo, trabajo de oficina. Así que en un local donde se congreguen 30 o 40 personas, el calor generado equivale, como mínimo, a 6-8 hornillas eléctricas de 1000 W emitiendo continuamente y la emisión de calor aumenta de manera notable a medida que la actividad es mayor. Además, en horas diurnas en países cálidos, la actividad humana concentrada incrementa la temperatura dentro de un local en varios grados y el calor en exceso puede causar estrés, yerros u otros daños a las personas, en mayor o menor medida según la persona afectada (Servicio Técnico de Asistencia Preventiva, 2024).

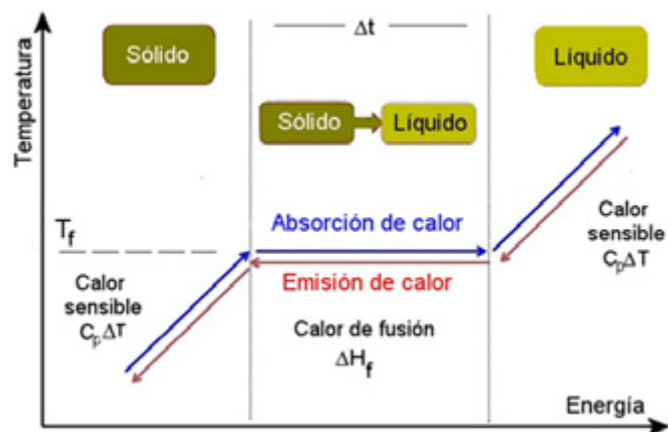


Fig. 1. Comportamiento de un material PCM al variar su temperatura. La energía intercambiada durante la fusión a T constante es el *calor latente de fusión*, asociado con una variación de entalpía ΔH_f .

La energía que causa variación de temperatura ΔT es el *calor sensible*, asociado con el calor específico c_p de la sustancia. En la figura, el intervalo de tiempo Δt no está asociado con las escalas; se usa para indicar el tiempo que transcurre al fundirse el PCM, que depende de factores, tales como: su homogeneidad y la conductividad térmica en su interior y con las paredes que lo contienen.

II. Técnicas PCM más utilizadas

Se han utilizado diferentes métodos para climatizar viviendas y edificios. Uno de ellos es colocar material PCM en el interior del local, cerca del techo (Waqas & Ud, 2013).



Fig. 2. Proceso de emisión y absorción de energía. Por la noche se abre el intercambio con el exterior y se cierra al llegar el día si el aire que circula es caliente. Al absorber el calor de la habitación, la temperatura se reduce. El aire caliente, menos denso, tiende a subir al techo de manera espontánea.

En la figura 2, por debajo de la temperatura de fusión T_f el material solidifica, desprendiendo calor. Por encima de T_f el material se funde y absorbe calor. A la temperatura T_f coexisten ambas fases. En locaciones donde la diferencia de temperatura entre la noche y el día alcanza 10 grados o más, este sistema ha mostrado ser útil para atenuar las variaciones de temperatura en el interior de viviendas y edificios, sin gasto de energía.

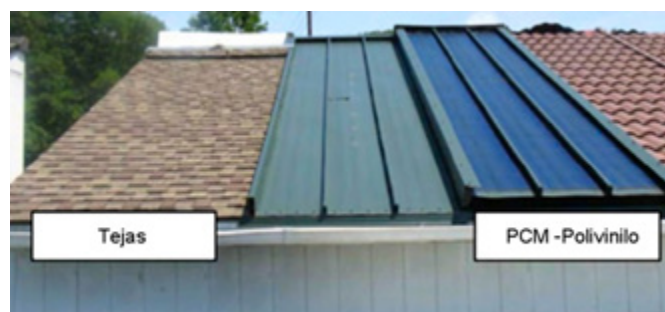


Fig. 3. Experimento para comparar los cambios de temperatura entre un tejado convencional de tejas de asfalto y uno cubierto con material PCM integrado en polivinilo.

Otro método muy investigado es el de colocar el material en las paredes interiores o exteriores de la vivienda. Una de las vías utilizadas es la introducción de cápsulas de PCM en paneles de yeso (Bravo *et al.*, 2020); otra, la instalación de materiales PCM en los techados para atenuar los cambios de temperatura, tanto en verano como en invierno (figura 3) (Kosny *et al.*, 2012). Los resultados mostraron mejoras en el comportamiento de los cambios máximos de temperatura en el interior de las viviendas.

También es usual llevar a cabo experimentos en el laboratorio (figura 4). En uno de estos se combinó el uso de un material PCM con la climatización convencional, con lo que se logró reducir entre 13 y 46 % la carga de un equipo de aire acondicionado en una habitación de 14 m², en una región

donde las diferencias de temperatura entre el día y la noche estaban en el orden de los 12-14 °C (Ummid, 2023).

No obstante, un artículo de revisión de 2022 con 126 referencias concluye que no existe una metodología ni parámetros únicos para comparar la eficiencia de diferentes sistemas y enfatiza en la necesidad de introducir parámetros básicos comunes, tales como: el coeficiente global de transmisión del calor, la velocidad de calentamiento, el tiempo de fusión/solidificación, la densidad y área de transferencia de energía. Esto ofrecería la posibilidad de evaluar, sin ambigüedades, la eficiencia de diferentes sistemas de enfriamiento pasivo en el laboratorio (Munteanu & Tudose, 2022).

III. Tipos de sustancias utilizadas como PCM

El PCM ideal sería aquel que presente alto valor de su calor latente; ausencia de sobreenfriamiento (que solidifique en su punto de fusión y no a menor T); buena conductividad térmica para que sea homogéneo el proceso de fusión-solidificación en su interior; poca variación de volumen durante la transición de fase; estabilidad química; ni inflamable, explosivo, tóxico o venenoso. Por último, debe ser accesible en grandes cantidades y barato.

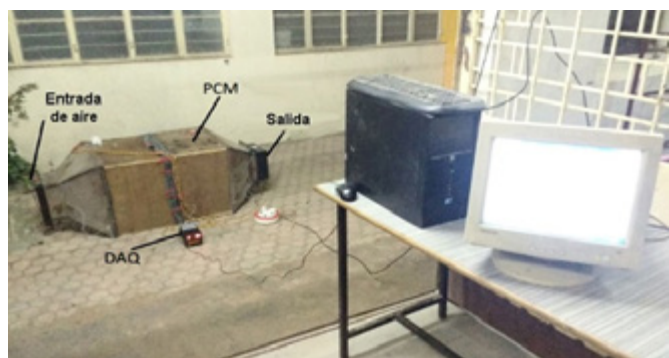


Fig. 4. Arreglo experimental en el laboratorio para determinar la eficiencia de una geometría PCM. DAQ: Sistema Digital de Adquisición de Datos utilizando sensores RTD (Detector de Temperatura Resistivo) para determinar la temperatura del aire a la entrada y a la salida.

Se utilizan los PCM orgánicos u inorgánicos (Khaled, 2024); la sustancia seleccionada depende en gran medida del lugar particular donde será utilizada. Por ejemplo, para locaciones cercanas al mar como La Habana, Cuba, donde las variaciones de temperatura del día a la noche en verano son de unos 10 °C y la media anual es de unos 25 °C (figura 5) (WS, 2024), la T_f seleccionada se encuentra usualmente entre los 20 y 33 °C.

En lugares de clima continental como Guanajuato, México, las variaciones de temperatura del día a la noche pueden llegar a 18 °C o más y habría que determinar la temperatura óptima en consecuencia. En la tabla 1 se muestran algunas sustancias con valores adecuados de T_f y su entalpía de fusión ΔH_f a esa temperatura (Podara *et al.*, 2021).

Como materiales inorgánicos es común utilizar hidratos salinos por no ser inflamables, el alto valor de su calor latente y su bajo precio. Tienen la desventaja de ser corrosivos, un poco inestables, poseer cierta tendencia al sobreenfriamiento y la mezcla de distintas sustancias de este tipo para obtener eutécticos permite regular la temperatura de fusión

deseada. Por otra parte, los materiales orgánicos son más caros e inflamables, pero resultan más estables desde el punto de vista químico y no presentan sobreenfriamiento.

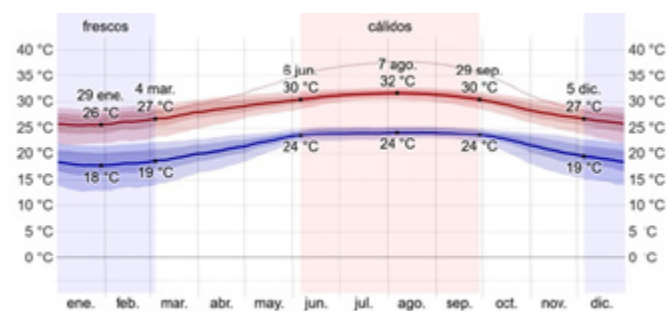


Fig. 5. Temperaturas máxima y mínima anual en La Habana (ref. 9). En <https://es.weatherspark.com> se puede acceder a más información sobre otras locaciones.

La necesidad de considerar sus características se evidenció en ensayos con paneles preparados para adosar en las paredes, rellenos con polietilenglicol o mezclas de sustancias grasas y parafinas, pues ocurrió sobrecalentamiento a causa de la mala conductividad térmica de la sustancia; además, las variaciones de volumen ocasionaron rajaduras por donde hubo escapes de líquido. Este comportamiento indeseado se trata de evitar encapsulando el PCM o mezclándolo con algún polímero inerte como, por ejemplo, añadiendo estireno-butadieno a la cera de parafina (Bon-temps & Royon, 2024).

Tabla 1. Materiales PCM con T_f cercana a 25 °C

Sustancia	T_f °C	ΔH_f (kJ/kg)
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	21	198
Heptadecano $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{15}-\text{CH}_3$	22	214
Cera de parafina RT25	24	164
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25.8	125.9
$\text{LiBO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	25.7	289
Ácido cáprico-ácido palmítico	26.2	177
Ácido cáprico-ácido esteárico	24.7	179
$\text{CaCl}_2 + \text{NaCl} + \text{KCl} + \text{H}_2\text{O}$	26-28	188

El intervalo de tiempo Δt en que el material se encuentra activo (figura 1) depende de la cantidad de PCM presente, de la diferencia de temperatura ambiente con su temperatura de fusión y del área de superficie en contacto con el medio. Algunos fabricantes usan el PCM fraccionado en pequeños contenedores, con el fin de aumentar el área de contacto y facilitar el intercambio con el medio. Por ejemplo, la empresa Tube ICE utiliza cilindros de 1 m de longitud y 5 cm de diámetro colgados del techo (figura 6). Los tubos pueden estar a la vista o camuflados con algún falso techo que permita la circulación del aire.

IV. Importancia de la conductividad térmica

Otro factor importante a tomar en cuenta es la conductividad térmica con el medio ambiente y en el interior del PCM.

Una mala conductividad causará una fusión incongruente, con lo que se alterará el intervalo de temperatura que se desea controlar. Para incrementar la conductividad se usan diversos métodos, tales como encapsular el PCM, añadir micropartículas conductoras en su interior o utilizar espuma metálica o grafito expandido. Esta última variante requiere del uso de vacío o de técnicas de impregnación y no es una tecnología de fácil acceso (ref. 2).

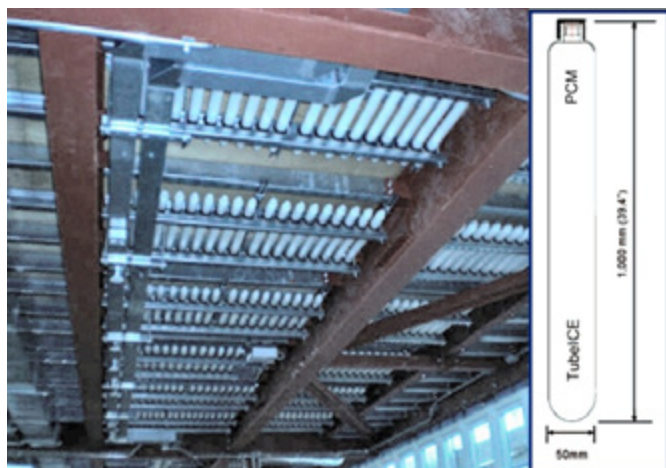


Fig. 6. Tubos PCM colocados en el techo de un local de la universidad de Westminster. La mayor superficie de contacto que brindan los tubos favorece el intercambio de calor con el medioambiente.

En el encapsulamiento, una reducción excesiva del tamaño de las cápsulas puede incrementar la resistencia térmica ($R = e/\lambda$ donde e es el espesor y λ la conductividad térmica del material); R representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor (Zhang *et al.*, 2010). Por otra parte, una mayor fracción envoltura/núcleo proporciona mejor conductividad térmica, pero reduce la rapidez del almacenamiento de energía a causa de la menor cantidad de PCM dentro de la cápsula (Salunkhe & Shembekar, 2013).

La variante de adición de micro y nanopartículas se usa, mayormente, en materiales orgánicos, tales como: parafinas, ácidos grasos, ésteres y alcoholes o sus mezclas. Se ha estudiado la adición de nanoestructuras basadas en carbono (Zhang *et al.*, 2019; Cheng *et al.*, 2018), así como nanopartículas metálicas de plata, cobre, níquel y magnesio que, si bien mejoran la conductividad térmica, presentan inconvenientes, como tendencia a la aglomeración, pobre estabilidad térmica y alta densidad (Qureshi *et al.*, 2018).

Las partículas no metálicas estudiadas incluyen, entre otras, alúmina (Al_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), óxido de titanio (TiO_2) y sílica mesoporosa SiO_2 , que mejoran la conductividad, pero también pueden presentar problemas de dispersión inadecuada (Mohamed *et al.*, 2017).

V. Conclusiones

Existe una amplia literatura a favor de la climatización pasiva en edificios, pero con el fin de garantizar una eficiencia adecuada y evitar la aparición de inconvenientes, es imprescindible tomar muy en cuenta la variación promedio de la temperatura ambiente en el lugar y época del año deseada, así como las características químicas, físicas y mecánicas del

material PCM utilizado. También es importante escoger una geometría acorde con las particularidades del recinto donde se desea instalar este tipo de climatización.

VI. Referencias bibliográficas

- Bontemps, A. J. & Royon, L. (2024). Technologies Using Phase Change Materials (PCM) for Building Passive Cooling, *Sustainable Architecture and Urban Development 1*, p.101. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22601.pdf>
- Bravo, J.P.; Venegas, T.; Correa, E.; Álamos, A. Sepúlveda, F. Vasco, D.A. & Barreneche, C. (2020). Experimental and Computational Study of the Implementation of mPCM-Modified Gypsum Boards in a Test Enclosure. *Buildings*, 10 (15). <https://www.mdpi.com/2075-5309/10/1/15>
- Cheng, W.L; Li, W.W.; Nian, Y.L. & Xia, W.D. (2018). Study of thermal conductive enhancement mechanism and selection criteria of carbon-additive for composite phase change materials. *Int. J. Heat Mass Transf.* 116, 507–511. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931017302454>
- Khaled, S. P. (2024). The use of Phase-Change-Material as cooling-strategy for buildings in the Chilean climate. *International Journal of Low Carbon Technologies* 3(2). https://www.researchgate.net/publication/245506364_The_use_of_Phase-Change-Material_as_cooling-strategy_for_buildings_in_the_Chilean_climate
- Kosny, J.; Biswas, K; Miller, W & Kriner, S. (2012). Field thermal performances of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink”, *Solar Energy* 86, 2504-2514. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12001983>
- Kuta M.; Matuszewska, D. & Wójcik, T.M. (2017). Reasonableness of phase change materials use for air conditioning—a short review. *E3S Web of Conferences* 14 e3sconf/201. Energy and Fuels. DOI: 10.1051/ 71401033. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/02/e3sconf_ef2017_01033.pdf
- Mohamed, N.H.; Soliman, F.S.; El Maghraby, H. & Moustfa, Y.M. (2017). Thermal conductivity enhancement of treated petroleum waxes, as phase change material, by nano alumina: Energy storage. *Sustain. Energy Rev.* 70, 1052–1058. https://www.researchgate.net/publication/311690167_Thermal_conductivity_enhancement_of_treated_petroleum_waxes_as_phase_change_material_by_a_nano_alumina_Energy_storage
- Munteanu I.G. & Tudose ETI. (2022). Laboratory Configurations for PCM-TES materials: A Review. *Journal of Advanced Thermal Science Research* 9, 50-68. <https://avantipublishers.com/index.php/jatsr/article/view/1271>
- Podara C.V.; Kartsonakis, I.A. & Charitidis, C.A. (2021). Towards Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Classification, Improvements and Applications in the Building Sector. *Appl. Sci.* 11, 1490. <https://doi.org/10.3390/app11041490>
- Qureshi Z.A.; Ali, H.M. & Khushnood, S. (2018). Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review. *Int. J. Heat Mass Transf.* 127, 838–856. https://www.researchgate.net/publication/327368576_Recent_advances_on_thermal_conductivity_enhancement_of_phase_change_materials_for_energy_storage_system_A_review

- Salunkhe, P.B. & Shembekar, P.S. (2012). A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 5603–5616. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112003711>
- Servicio Técnico de Asistencia Preventiva U.G.T. - Castilla y León. (2024). Efectos del trabajo en ambientes calurosos. <http://www.ugtcyl.es/prevencion/archivos/medicina/calor-cuerpo-humano.pdf>
- Shaikha U. I.; Surc S.K.A. & Royc, A. (2023). Performance analysis of an energy efficient pcm-based room cooling system. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)* 20 (28). <https://www.techscience.com/fhmt/v20n1/52390>
- Waqas Adeel & Ud Din Zia. (2013). Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18; 607–625. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211200576X>
- WeatherSpark.com. The Weather Year Round Anywhere on Earth. (2024), <https://es.weatherspark.com/y/16780/Clima-promedio-en-La-Habana-Cuba-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Zhang, H; Wang, X. & Wu, D. (2010). Silica encapsulation of n-oc-tadecane via sol-gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance. *J. Colloid Interface Sci.* 343, 246–255. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20035943/>
- Zhang, Y.; Wang K.; Tao, W. & Li, D. (2019). Preparation of microencapsulated phase change materials used graphene oxide to improve thermal stability and its incorporation in gypsum materials. *Constr. Build. Mater.* 224, 48–56. <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/11/2441>

Conflicto de intereses: Los autores no declaran conflicto de intereses vinculados a la investigación presentada.

Contribución de los autores

Conceptualización, Curación de Datos, Análisis Formal, Investigación, Metodología: Nelly Sarai Ramos Reyes, Francisco Antonio Horta Rangel y Arnaldo González Arias.

Supervisión, Redacción – borrador original: Arnaldo González Arias.

Redacción – revisión y edición: Nelly Sarai Ramos Reyes, Francisco Antonio Horta Rangel y Arnaldo González Arias.

Recibido: 25 abril de 2024

Aceptado: 28 de mayo de 2024