

Anexo 1 - Almacenamiento de energía térmico

Tabla de contenidos

ANEXO 1 - ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICO	44
Introducción.....	48
Almacenamiento térmico	49
Almacenamiento del calor sensible.....	49
Almacenamiento del calor latente	51
Almacenamiento termoquímico	52
Almacenamiento térmico en PCMs.....	53
Propiedades	53
Clasificación	54
Comercialización	56
Aplicaciones PCMs.....	57
Bibliografía	61

Introducción

La base de la sociedad moderna y del desarrollo humano es la energía. Esta debe producirse de forma ininterrumpida y continua, atendiendo a las necesidades puntuales y temporales de la humanidad.[1]

En una era de cambio energético, donde las fuentes de energía no renovables y altamente contaminantes se encuentran en proceso de desaparición, se potencian las fuentes de energía renovable. No obstante, estas se ven sujetas a la climatología, causando una producción intermitente y, por consiguiente, un desfase entre la energía producida y la demandada. Por ello, el almacenamiento energético se erige como solución al problema.

La energía puede ser almacenada de forma mecánica, química, biológica, magnética o térmica. [Figura 1A] Entre todas ellas, la más utilizada es la térmica debido a su bajo coste, su carácter no contaminante y la abundancia de posibles fuentes depositarias de la energía.[1]

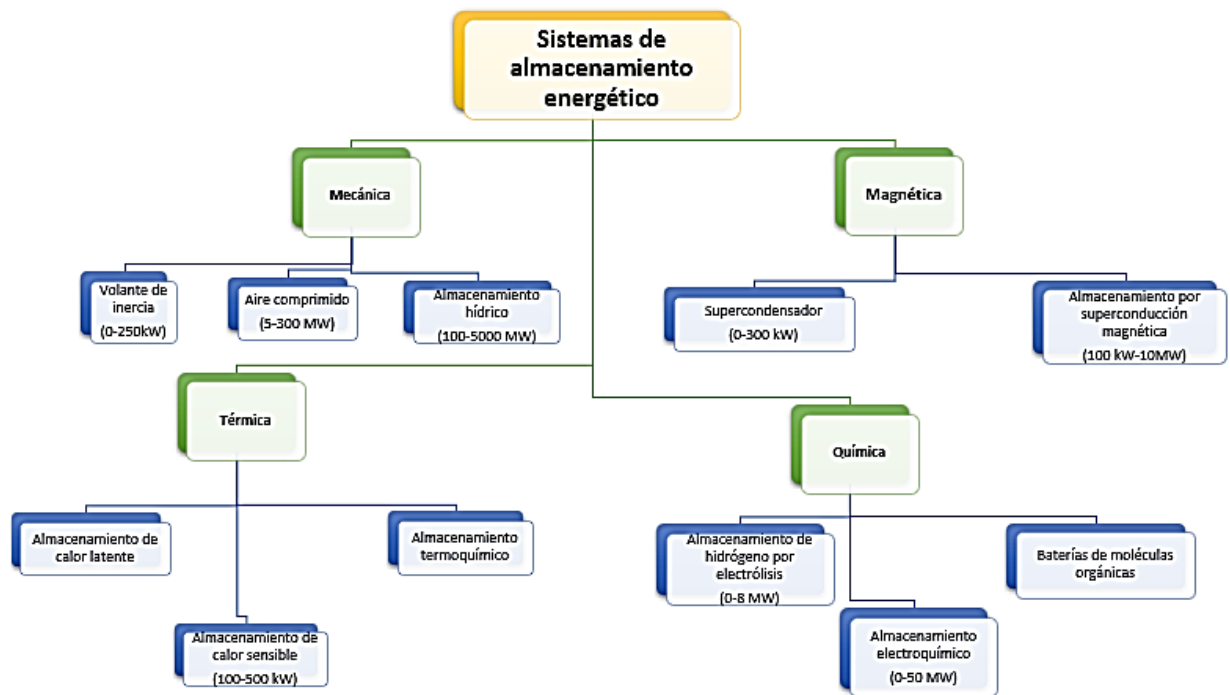


Figura 1A. Medios de almacenamiento, sus técnicas y capacidad de almacenamiento[2]

Almacenamiento térmico

El almacenamiento térmico se basa en tres etapas: carga, almacenamiento y descarga. [Figura 2A]

- Carga: etapa durante la cual el material recibe y almacena energía por medio de una transferencia de calor.
- Almacenamiento: etapa durante la cual el material se mantiene a temperatura constante a la espera de ceder la energía conservada.
- Descarga: etapa durante la cual el material cede la energía almacenada por medio de una transferencia de calor.

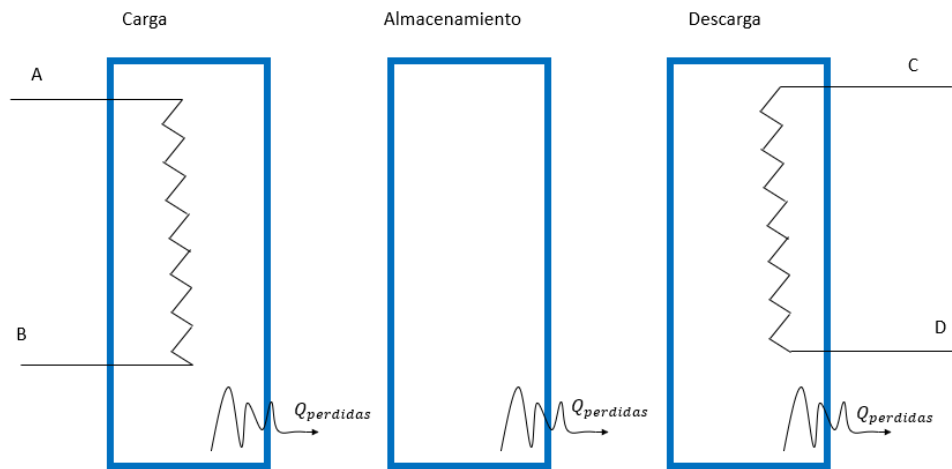


Figura 2A. Etapas del almacenamiento térmico [3]

El almacenamiento térmico, y en general todo tipo de almacenamiento, es susceptible de tener pérdidas. Por consiguiente, debe existir una razón para llevarlo a cabo, por ejemplo, la gestión o reducción de la demanda eléctrica, lograr mayor eficiencia en otros equipos de generación térmica o la compra de energía durante las horas de tarificación más baja.

El almacenamiento térmico puede ser clasificado en tres grandes grupos: almacenamiento del calor sensible (Sensible Heat Storage (SHS)), almacenamiento del calor latente (Latent Heat Storage (LHS)) y almacenamiento termoquímico (Thermo-chemical Storage (TCS)).[1]

Almacenamiento del calor sensible

La energía térmica se almacena en forma de un incremento de temperatura durante el cual no existe un cambio de estado o fase. [Figura 3A]

La cantidad de energía almacenada se puede estimar conociendo la masa, la capacidad térmica y el incremento de temperatura del material.[1]

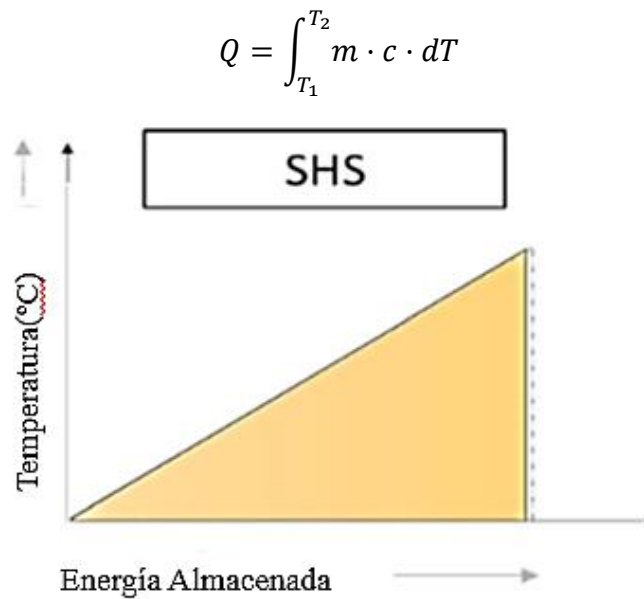


Figura 3A. Representación de la energía almacenada según el aumento de la temperatura en un material SHS [2]

El fluido líquido predilecto usado es el agua debido a su bajo coste, su asequibilidad, no ser tóxica y su alto calor específico. Debido a su bajo punto de ebullición, tiene un rango de utilización bajo, de 25°C a 90°C. Sin embargo, también puede ser utilizada en aplicaciones a altas temperaturas en forma de vapor, aunque se requieren costosas medidas de contención para resistir las altas presiones. No obstante, el agua tiene ciertas desventajas, su alta presión de vapor y su corrosividad, que aumentan los costes de la instalación y su mantenimiento.[4]

Por lo tanto, existen alternativas, como los aceites refinados del petróleo, que pueden trabajar a temperaturas superiores, hasta 400°C, ya que poseen puntos de ebullición mayores. Comparándolos con el agua, tienen menor calor específico, son más caros y pueden ser tóxicos. Además, suelen verse degradados tras un largo número de ciclos térmicos y pueden verse oxidados a altas temperaturas, produciéndose ácidos que pudieran dañar los contenedores.[4]

Cuando se desean temperaturas incluso superiores a las ofrecidas por los aceites, se recurre a las sales fundidas. Su punto de fusión es alto, poseen alta capacidad volumétrica de almacenamiento térmico, alta estabilidad térmica y su presión de vapor es casi nula. Además, son baratas, asequibles, no tóxicas o inflamables. Sin embargo, poseen baja conductividad térmica y su alto punto de fusión reduce su aplicación a actividades de flujo continuo, pues existe el riesgo de que solidifiquen y obturen sistemas como tuberías durante la noche.[4]

Otra opción en aplicaciones a altas temperaturas son los metales líquidos. Poseen magníficas propiedades térmicas: conductividad térmica, gran variedad de puntos de fusión y alto calor específico. No obstante, son caros y puede producir corrosión galvánica si el contenedor es metálico.[4]

En el campo de los materiales sólidos, son empleados rocas, arena o grava. Son baratos, asequibles, no tóxicos o inflamables y, además, actúan tanto como superficie de transferencia térmica como medio de almacenamiento. Otra opción son los materiales de construcción como el hormigón o el ladrillo, puesto que no requieren de contenedor y tienen buenas propiedades térmicas y mecánicas. [4]

Las principales ventajas del almacenamiento del calor sensible son el bajo coste de los materiales, a excepción de los aceites refinados y los metales líquidos, y la estabilidad térmica a altas temperaturas de estos. No obstante, su principal inconveniente es la necesidad de mantener

saltos de temperaturas constantes a fin de conseguir una transferencia de calor constante. Esto se logra mediante altos saltos de temperatura o moderados saltos de temperatura con mayores volúmenes, aplicación imposible en envolventes de edificios.[4]

Almacenamiento del calor latente

La energía se almacena durante el proceso de cambio de fase o estructura atómica de carácter generalmente isotérmico en sustancias puras. Además de intervenir el calor latente, también se almacena energía mediante el anterior proceso, por calor sensible, durante el incremento de temperatura para alcanzar la temperatura de inicio de transición de fase y posteriormente, tras la finalización del cambio de fase, en el incremento de temperatura de seguridad para evitar que el material debido a las pérdidas baje su temperatura hasta la temperatura de transición de fase. [Figura 4A]

La cantidad de energía almacenada se puede estimar con el calor latente implicado y el incremento de temperatura (calor sensible) en las dos fases.[1]

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_{fase_1} \cdot dT + m \cdot c_L + \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_{fase_2} \cdot dT$$

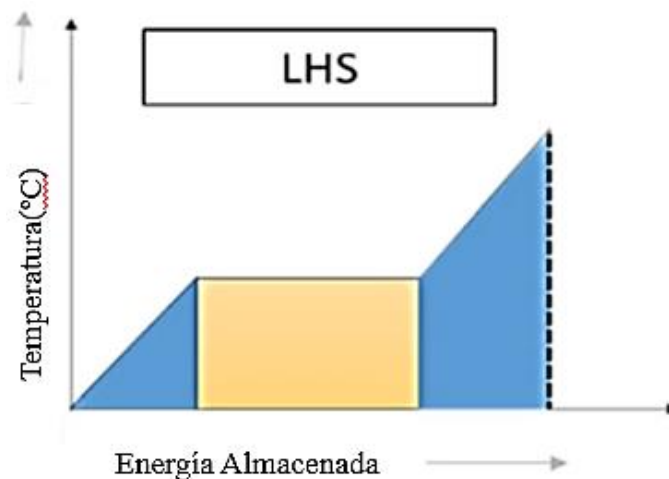


Figura 4A. Representación de la energía almacenada según el aumento de la temperatura en un material LHS [2]

Dentro de los diferentes cambios de fase, el sólido-líquido es preferido por la menor variación de volumen producida durante los cambios de fase a diferencia de los procesos donde el estado gaseoso participa. El grupo de materiales con cambio de fase sólido-líquido son llamados PCMs (Phase Change Materials (Materiales de cambio de fase)). Presentan mayor densidad de almacenamiento que el calor sensible y debido a su cambio de fase isotérmico suministran flujos de calor constantes. No obstante, su conductividad térmica es baja como norma general y algunos materiales presentan problemas de compatibilidad, inflamabilidad o corrosión. Este tipo de almacenamiento será desarrollado en profundidad en capítulos posteriores.

Almacenamiento termoquímico

La energía es almacenada en forma de un cambio de entalpía durante una reacción termoquímica, como, por ejemplo, adsorción química o reacciones gas-sólido reversibles donde la carga es una reacción endotérmica y la descarga es exotérmica. Para la adsorción química suelen emplearse sales metálicas con agua, amoníaco, metanol o aleaciones metálicas con hidrógeno. Las reacciones reversibles suelen centrarse en la hidratación/deshidratación o en la carbonatación/calcinación de óxidos metálicos. [5][Figura 5A]

La energía almacenada se puede estimar con la masa de reactivo m , la fracción reaccionada a_r y el calor de reacción por unidad de masa Δh , como la variación de entalpía producida entre los reactivos y los productos. [6]

$$Q = m * a_r * \Delta h$$

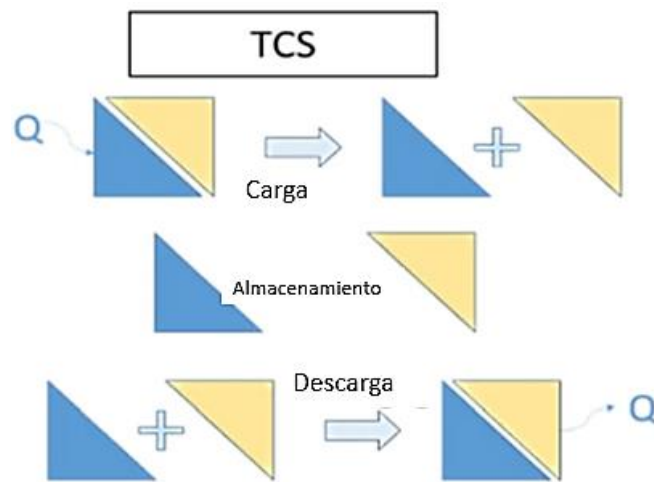


Figura 5A. Representación de las tres etapas en un material TCS [2]

Tiene mayor densidad de almacenamiento térmico que el calor sensible o el latente y la energía se puede almacenar durante largos tiempos sin grandes pérdidas térmicas. No obstante, su investigación es aún incipiente y, por ende, su coste es alto y su implementación es dispersa. No obstante, recientemente ha sido aplicado a las lavavajillas mediante el uso de zeolitas.[4]

A lo largo de la historia, la humanidad ha recurrido al calor sensible puesto que era tangible y fácil de manipular y al calor latente, en el caso del hielo. Actualmente, con una ciencia y tecnología más sofisticada, la industria se decanta por los procesos de tipo LHS.

Almacenamiento térmico en PCM

La existencia del almacenamiento térmico en PCM se remonta a la aparición del agua en el planeta y, por ende, el hielo. El descubrimiento de otros PCM no comienza hasta principios del siglo XX por parte de Alan Tower Waterman en la Universidad de Yale. Mientras estudiaba la emisión termiónica de sales calientes alcalinas y alcalinotérreas, advirtió peculiaridades en la conductividad de la molibdenita (MoS_2). Descubrió que la conductividad del mineral podía ser modificada progresivamente.[7]

A partir de entonces, este fenómeno comenzó a ser estudiado en profundidad, descubriéndose muchos otros compuestos con propiedades similares que además compartían calores latentes altos y, por lo tanto, podían ser utilizados en el almacenamiento de energía térmica.

Propiedades

En la [Figura 6A] se pueden observar las propiedades ideales de un PCM. Ningún material posee todas ellas y por ello, es necesario realizar procedimientos complementarios a fin de mejorar sus prestaciones.

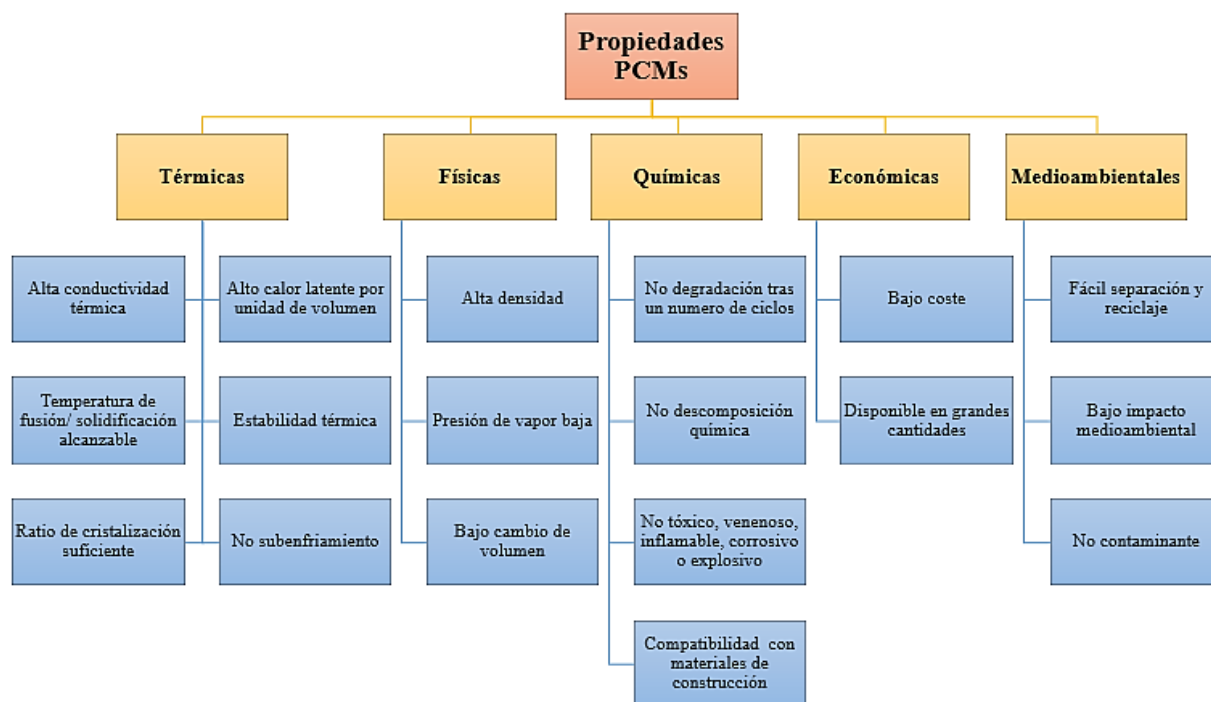


Figura 6A. Propiedades ideales de los PCM[1], [8], [9]

Cabe destacar que la inexistencia de subenfriamiento es de vital importancia. El subenfriamiento es el estado en el que un líquido se encuentra a una temperatura inferior a la de su punto de fusión/solidificación y no se produce cristalización. Un material con esta propiedad se comportaría de forma errática durante los cambios de fase y no se podría saber con certeza a la temperatura a la que va a comenzar a solidificar.

Otras propiedades de importancia, son la conductividad térmica que condiciona la transferencia del calor o un bajo cambio de volumen debido a que generalmente los materiales son aislados con el fin de evitar fugas durante el estado líquido.

Además, la aplicación o el uso definido restringe las propiedades deseadas, por ejemplo, la temperatura de fusión/solidificación deber ser cercana a la temperatura de operación o la no inflamabilidad o explosividad es necesaria en procesos a altas temperaturas.

Clasificación

A nivel químico los PCMs se pueden catalogar según [Figura 7A]

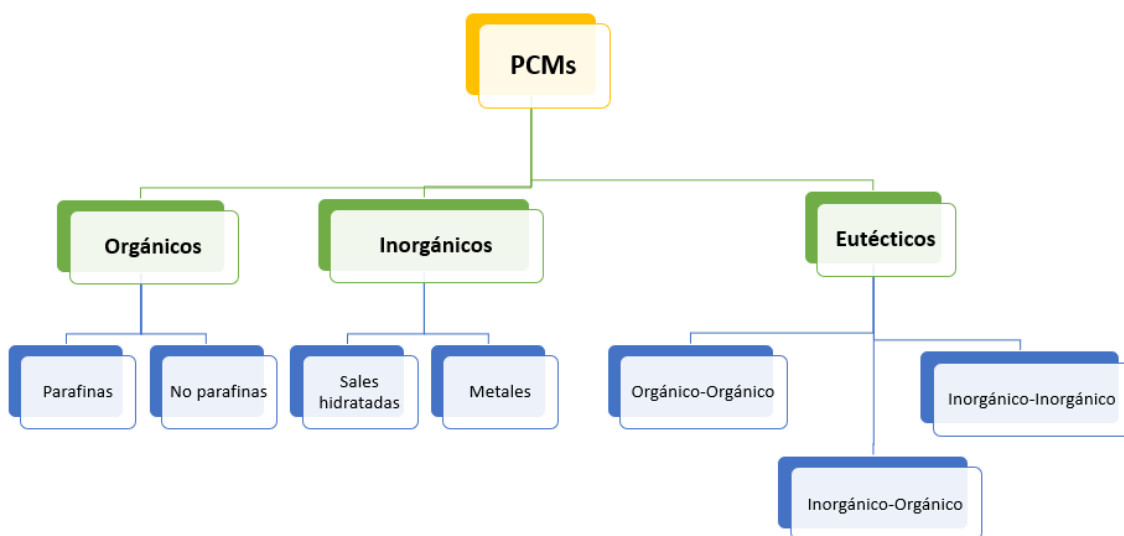


Figura 7A. Clasificación química de los PCMs[1]

Los primeros se pueden subdividir en: parafinas y no parafinas.

Las parafinas naturales son mezclas de alcanos puros. Su fórmula química es $CH_3(CH_2)_nCH_3$. Son químicamente inertes, tienen baja presión de vapor, alto calor latente de fusión, tienen un subenfriamiento muy bajo y no se degradan. Además, son baratas, no tóxicas y no contaminantes. No obstante, carecen de una buena conductividad térmica, pueden ser inflamables y son incompatibles con los plásticos. Debido a ello, son generalmente encapsuladas en metales para aumentar la conductividad térmica general del sistema y evitar filtraciones.[8]–[10]

El grupo de las “no parafinas” incluye, entre otros, glicoles, alcoholes, ésteres y ácidos grasos. Disponen de excelentes propiedades durante sus cambios de fase, pero son tres veces más caros que las parafinas. Son de gran interés los ácidos grasos que gozan de puntos de fusión relativamente bajos, alto calor latente de fusión, bajo cambio de volumen durante los cambios de fase y no sufren subenfriamiento durante la solidificación. Especialmente, seis ácidos grasos son utilizados con preponderancia: ácido caproico, ácido caprílico, ácido mirístico, ácido palmítico, ácido láurico y ácido esteárico. [8]–[10]

Los segundos de ellos se pueden subdividir en: sales hidratadas y metales.

Las sales hidratadas incluyen óxidos, carbonatos, sulfatos y nitratos con moléculas de agua en ratios específicos. Tienen mayor calor latente de fusión y conductividad térmica, pero menor cambio de volumen que los compuestos orgánicos. Además, son baratas y no inflamables. No obstante, algunas son corrosivas con los metales, son ligeramente tóxicas, adolecen de subenfriamiento o se descomponen durante los cambios de fase, reduciéndose cíclicamente su capacidad de almacenamiento. Por ello, es necesario realizar procesos adicionales para aislarlas del sistema. [8]–[10]

Los metales y aleaciones utilizados deben tener un bajo punto de fusión. Debido a su bajo calor latente y su alta densidad, no son materiales muy utilizados. Sin embargo, en aplicaciones donde la compactibilidad es importante son apreciados por su alto calor latente de fusión por unidad de volumen y su alta conductividad térmica. Además, tienen estabilidad química y térmica y no suelen ser tóxicos. Los metales utilizados en aplicaciones a baja temperatura son el cesio, el galio, el indio, el estaño o el bismuto. Para aplicaciones a mayores temperaturas, se utilizan el zinc, el magnesio, el aluminio y sus aleaciones. [8]–[10]

Los terceros son composiciones congruentes de dos o más compuestos que se funden y solidifican como un único componente. Su interés radica en puntos de fusión/solidificación más bajos que sus compuestos independientes. Estos pueden subdividirse, dependiendo de los compuestos que los integran, en: orgánico-orgánico, inorgánico-orgánico e inorgánico-inorgánico. [8]–[10]

De forma genérica, no se descomponen durante los cambios de fase, tienen buena conductividad térmica y alto calor latente de fusión. Sin embargo, se encuentran en una etapa temprana de desarrollo, siendo su coste actual de producción alto. [8]–[10]

A continuación, se comparan los compuestos orgánicos e inorgánicos. [Tabla 1A]

	Orgánicos		Inorgánicos	
	Parafinas	No Parafinas	Sales hidratadas	Metales
Conductividad térmica	Muy baja	Baja	Alta	Muy alta
Temperatura de fusión	-20 a 100°C	5 a 120°C	0 a 100°C	150 a 800°C
Calor latente (kJ/kg)	200-280	90-250	60-300	25-100
Corrosividad	No corrosivas	Ligeramente corrosivas	Corrosivas	Varía
Precio	Medio	Muy alto	Bajo	Alto
Estabilidad del ciclo térmico	Estable	Inestabilidad a temperaturas elevadas	Inestable	Estable
Densidad	Media	Media	Baja	Alta

Tabla 1A. Comparativa entre compuestos orgánicos e inorgánicos[11]

Comercialización

En el sector de las sustancias puras, **Mitsubishi Chemicals** fabrica y comercializa sus productos sin ningún tipo de procedimiento adicional. Además, proveedores de productos químicos, como **Sigma-Aldrich**, comercializan sin ser productores de PCMs. Sin embargo, existen muchas otras propuestas de comercialización. Algunas de ellas son las disoluciones, las emulsiones o las suspensiones. Estas son vendidas encapsuladas o no, siendo los recipientes más habituales esferas, paneles o tubos.

La empresa **PCM**, [Figura 8A] empresa británica con dos décadas de experiencia, se centra en sales hidratadas, compuestos orgánicos y eutécticos.[12]

- Compuestos eutécticos: disoluciones de sales en agua con temperaturas de cambio de fase entre -65°C y 0°C .
- Sales hidratadas: temperaturas de cambio de fase entre 7°C y 117°C .
- Compuestos orgánicos: ceras, aceites, ácidos grasos y poliglicoles con temperaturas de cambio de fase entre 1°C y 167°C .

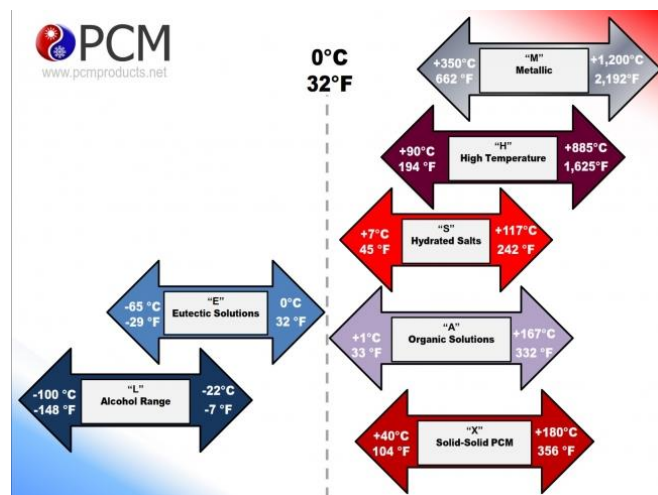


Figura 8A. Productos comercializados por PCM[12]

Sus productos pueden ser adquiridos puros o encapsulados en tubos, bolsas o paneles ya preparados para ser utilizados. Además, comercializan también alcoholes con baja temperatura de solidificación, compuestos metálicos y compuestos orgánicos e inorgánicos con altas temperaturas de cambio de fase.[12]

Otra empresa con gran presencia en el mercado es **Rubitherm**. Empresa alemana con casi tres décadas de experiencia se centra en dos líneas de productos: la orgánica, llamada RT, con temperaturas de cambio de fase desde -9°C a 100°C y la línea inorgánica/mezclas, llamada SP con temperaturas de cambio de fase desde -50°C a 100°C . Comercializan sus productos puros, macroencapsulados en paneles o microencapsulados en forma seca o acuosa.

En el campo de las sales hidratadas, existe una gran competencia. **PCP Australia** las comercializa en un rango de temperaturas de entre -21°C y 29°C . **TEAPPCM** presenta sus sales hidratadas en paneles, esferas y camisas con un rango de temperaturas de -50°C a 89°C . Finalmente, **Climator** comercializa su sal hidratada eutéctica llamada “*Climsel*” con rangos de temperatura de entre -21°C a 70°C .

En el campo de las bioceras de origen no petrolero, **CRODA** distribuye en un rango de -22°C a 60°C , presentándolas microencapsuladas en cápsulas de polímero acrílico. Además, **PureTemp** también comercializa específicamente estos materiales en un rango de temperatura de -37°C a 151°C . Ambas empresas producen sus bioceras a partir de productor agrícolas y, por lo tanto, sus productos no son tóxicos o contaminantes al medio ambiente puesto que se degradan al ser materia orgánica.

En el sector de los acumuladores térmicos, **Tempack** los ofrece a base de eutécticos en un rango de temperaturas de -4°C a 37°C . También comercializan en forma de geles eutécticos acumuladores de congelación, -21°C , y de refrigeración.

Otras empresas, como **Cristopia**, presentan sistemas completos para su utilización inmediata. Cristopia presenta un sistema de refrigeración basado en cubas con nódulos (esferas) de eutécticos microencapsulados con poliolefinas bañados en un fluido que se comporta como caloportador.

Otras empresas como **SavEnrg** son más versátiles y comercializan en un rango de temperaturas de -26°C a 37°C , ofreciendo materiales orgánicos para aplicaciones de incubación y refrigeración y sales hidratadas para procesos de congelación.

Finalmente, existen empresas que presentan únicamente sus productos encapsulados. **MikroCaps** y **Microtek** disponen de rangos de temperatura de, respectivamente, -21°C a 70°C y -30°C a 57°C . Mientras que el primero presenta sus productos exclusivamente microencapsulados, el segundo además los presenta macroencapsulados en paneles y comercializan suspensiones.

En cuanto a la microencapsulación, **Regin et al. (2007)** [13] resaltaron en los materiales utilizados en el proceso, las siguientes cualidades y propiedades:

1. Buena resistencia mecánica y a la corrosión;
2. Flexibilidad para resistir los cambios de fase por las variaciones de volumen;
3. Estabilidad térmica;
4. Deben proteger al PCM del exterior;
5. Deben proveer de suficiente superficie de intercambio de calor;
6. Ser compactos y fáciles de manipular.

De forma general, el precio de las sustancias puras es aproximadamente $1\text{€}/\text{kg}$. No obstante, su compra en forma de macro o microencapsulación aumenta los precios.

Aplicaciones PCMs

En el sector sanitario, destacan en el transporte de órganos, tejidos o sangre ya que estos deben mantenerse a temperaturas constantes durante todo su traslado para que lleguen en buen estado. Además, son frecuentemente utilizados en los tratamientos de enfriamiento local durante operaciones en detrimento del hielo que puede provocar hipotermia local. También, suelen ser utilizados en las mantas térmicas utilizadas en caso de hipotermia o quemaduras graves ya que ceden/absorben calor de forma constante.[14]

Además, debido a su bajo coste comienzan a emplearse para tratamientos de enfermedades tropicales en países pobres. **Junghans et al. (2009)** [15] desarrollaron un

tratamiento alternativo a la cirugía para el tratamiento de la úlcera de Buruli. Esta enfermedad infecciosa, provocada por una bacteria similar a la de la lepra, ocasiona grandes lesiones cutáneas sobre todo el cuerpo, especialmente en las extremidades. El tratamiento recomendado generalmente es la toma de antibióticos. No obstante, en casos de grandes ulceraciones se recomendaba la cirugía a fin de eliminar el tejido necrótico, proceso que generalmente producía discapacidades y problemas motores. Dado que estos últimos casos se dan mucho más frecuentemente en países pobres y sumado al conocimiento general de que la bacteria muere a los 37°C, se había tratado realizar termoterapias en los años 50, pero debido al alto coste, el tratamiento era inviable en zonas sin acceso a los medicamentos. Basándose en este tratamiento, el doctor **Junghanss et al.** realizaron un estudio médico con cinco pacientes con grandes úlceras, aplicándoles bolsas de acetato de sodio trihidratado ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), que tiene una temperatura de fusión de 58°C, durante aproximadamente 10 horas al día durante 4-5 semanas. Todos los pacientes sanaron satisfactoriamente, no requirieron ninguna intervención quirúrgica ni sufrieron incapacidades o problemas motores permanentes.

En la industria textil, la utilización de los PCMs es aún incipiente debido a la reducción de la calidad al tacto que se produce y, por ende, no son aplicables en tejidos finos o de uso cotidiano. No obstante, en algunos sectores, como el aeroespacial, son indispensables. Por ejemplo, en la confección de trajes y guantes espaciales para proteger a los astronautas de las grandes fluctuaciones térmicas en el vacío. Además, se están comenzando a integrar en prendas térmicas como guantes o abrigos para deportes de nieve. [16]

En el polo opuesto térmico, **Fonseca et al. (2017)** [17] realizaron un estudio del comportamiento térmico de las prendas ignífugas de bomberos a fin de sentar pautas para su confección. El trabajo modelizó las diferentes capas de las prendas con diferentes masas de PCM y con flujos de calor bajos y medios, concluyendo que gran parte del calor era absorbido por el PCM y que la mejor posición del material era cerca del foco térmico emisor, es decir, lo más lejos posible de la piel.

Vadicherla et al. (2012) [18]: el trabajo presenta una comparación entre dos asientos de coche, uno con PCM integrado en su interior y uno sin él. El PCM escogido fue el octadecano con una temperatura de fusión de 28.2°C. Se concluyó mediante ensayos sobre cada uno de los asientos que el portador de PCM demostró tener mejores propiedades termorreguladoras que el convencional. [34]

En el campo de la protección personal, especialmente los cascos, su implementación tiene como objetivo el confort térmico de la persona que lo porta.

Por ejemplo, **Tan y Fok (2006)** [19] estudiaron la refrigeración de cascos de motocicletas. Debido a los requerimientos técnicos y los materiales utilizados (kevlar, plásticos o fibra de carbono) restringen casi completamente el intercambio de calor con el exterior y provoca que las temperaturas dentro del casco puedan alcanzar los 37-38°C. Por ello, actualmente se utilizan respiraderos para que el aire pueda pasar por el interior y reducir la temperatura. No obstante, esta solución no es muy adecuada para climas tropicales. A razón de ellos, la investigación fue dirigida hacia el uso de enfriadores termoeléctricos, pero estos requieren de una fuente de alimentación constante que debe ser integrada en los propios cascos. Por esta razón, Tan y Fok dirigieron su estudio hacia el uso de PCMs. A lo largo de su investigación, sugirieron la inclusión de una capa de C28 (Climator) en el casco con el fin de mantenerlo a una temperatura aproximada de 28-30°C. Se llegó a la conclusión de que esta estrategia podía permitir la refrigeración del casco durante al

menos 2 horas, aunque destacaban que después de cada uso era necesario la consiguiente descarga.

En la misma línea, **Ghani y et al. (2017)** [20]: estudiaron la refrigeración de cascos de construcción mediante PCMs en zonas áridas. Mediante un modelo numérico simularon el salto de temperaturas entre un casco con PCM y uno sin él con diferentes velocidades de viento. Los resultados mostraban que la temperatura del interior del caso se veía reducida de 47°C a 40°C de media durante un periodo de tiempo de 2 horas. Actualmente, son activamente empleados en las obras realizadas en Catar para la Copa Mundial de Fútbol de la FIFA Catar 2022.

En el sector de la construcción, se busca el aumento de la inercia térmica, el aumento de la eficiencia energética o la disminución de energía en la climatización.

Rodríguez-Ubinas et al. (2012) [21] realizaron una revisión de las aplicaciones de PCMs en casas con alta eficiencia energética que participaron en el Decatlón Solar Americano, competición internacional que premia el confort térmico y la eficiencia energética. Clasificaron su aplicación dentro de los edificios en dos niveles: tipo de sistema de carga/descarga e implementación del PCM en los edificios. [Figura 9A]

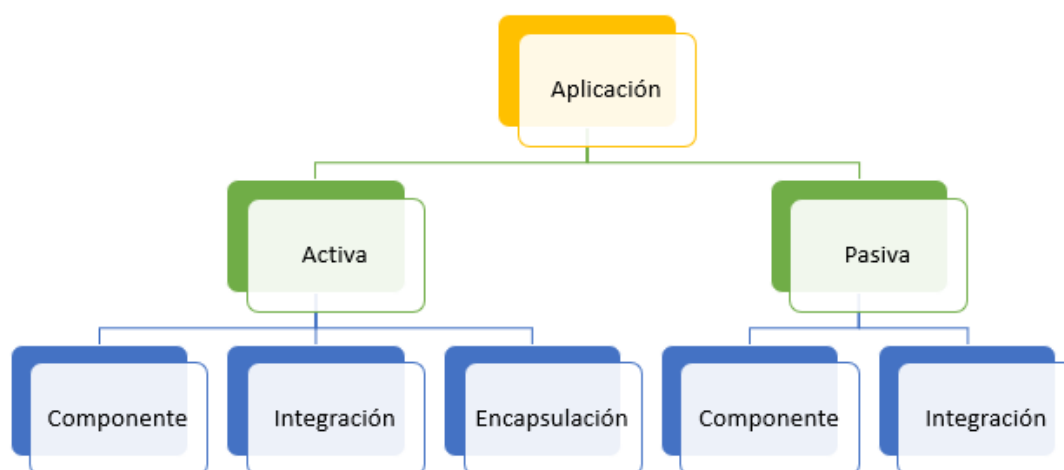


Figura 9A. Clasificación según la aplicación del PCM en el edificio **Rodríguez-Ubinas et al. (2012)**

En el primer nivel de la clasificación, dividieron el sistema empleado en pasivo o activo. En el primer caso, las cargas y descargas térmicas del sistema de almacenamiento se llevan a cabo por las variaciones de la temperatura ambiente. Por el contrario, en el caso de un sistema activo, la carga y descarga térmicas son llevadas a cabo mediante medios mecánicos. Generalmente, estos medios suelen ser la convección forzada interior o exterior de agua, aire u ambos a la vez.

En el segundo nivel de la clasificación, se aborda la integración de los PCMs en el inmueble. Detallan que las opciones son su inclusión como componente pleno, su integración en los materiales de construcción o en unidades de almacenamiento.

En el primer caso, el PCM es integrado en el edificio como una capa o parte del edificio. Detallan que este método es aplicable en suelos, techos o paredes con el único requerimiento de aislarlo con capas que impidan su migración durante el cambio de fase a estado líquido.

En el segundo caso, el PCM y el material de construcción son combinados. **Lopes Soares (2015)** detalla la existencia de dos métodos, la incorporación directa y la impregnación.[10]

- Incorporación directa: el PCM es mezclado con los materiales de construcción. Es un método fácil y barato. No obstante, puede haber pérdidas e incompatibilidades con los materiales a largo plazo.
- Impregnación: el material de construcción, que debe ser poroso, se sumerge en el PCM líquido, absorbiéndose por efecto capilar este último. Surgen los mismos problemas que en el método de incorporación directa.

En el tercer caso, el PCM se introduce dentro de compartimentos estancos que evitan los problemas de los métodos anteriores. Estas unidades de almacenamiento se clasifican dependiendo de su tamaño en macrocápsulas o microcápsulas.

De forma más general, en **Mofijur et al. (2019)** [22] se agruparon decenas de estudios con la intención de presentar las diferentes aplicaciones de los PCMs en el uso y almacenamiento de energía. Se detallaron cuatro aplicaciones:

1. Almacenamiento de energía solar en centrales solares térmicas: a diferencia de las centrales solares fotovoltaicas, las centrales solares térmicas calientan un fluido mediante la concentración de luz solar mediante heliostatos en un receptor solar. Posteriormente, este fluido calienta agua que sigue un ciclo Rankine produciendo electricidad. Dadas las variaciones de la demanda de electricidad y la intermitencia de la energía solar, se propone el almacenamiento de la energía excedente en tanques a través de los cuales el agua pueda ser calentada y producir electricidad.
2. Sistemas de calentamiento de agua: son sistemas muy simples formados por un calentador solar y un tanque de almacenamiento. Durante el día, el agua es calentada y almacenada en el tanque y al mismo tiempo que el PCM absorbe energía del agua caliente. Por la noche, cuando no hay luz solar, el PCM cede su energía al agua calentándola. Estos sistemas son baratos, fáciles de mantener y fabricar.
3. Hornos solares: compuesto por un colector solar con un concentrador, una unidad de almacenamiento térmico y una unidad interna de cocción. Actualmente, se encuentran aún en investigación y no es posible su aplicación masiva puesto que el coste de inicio del sistema es alto, pero a largo plazo podría ser asequibles si el precio de los PCMs se redujera.
4. Secadores solares: mismo sistema que los hornos solares a excepción de que en este caso las temperaturas son menores y la unidad de cocción es sustituida por una cámara de secado. Actualmente, se encuentran aún en proceso de investigación, aunque su futuro es prometedor debido a la gran demanda energética de los secados.

Bibliografía

- [1] C. Wang y Y. Zhu, «Experimental and Numerical Studies on Phase Change Materials», en *Phase Change Materials and Their Applications*, M. Mhadhbi, Ed. IntechOpen, 2018.
- [2] S. Kashyap, S. Kabra, y B. Kandasubramanian, «Graphene aerogel-based phase changing composites for thermal energy storage systems», *J. Mater. Sci.*, vol. 55, n.º 10, pp. 4127-4156, 2020, doi: 10.1007/s10853-019-04325-7.
- [3] A. Lázaro Álvarez, «Apuntes Curso: Fundamentals of thermal energy storage with phase change materials», 2019.
- [4] G. Alva, Y. Lin, y G. Fang, «An overview of thermal energy storage systems», *Energy*, vol. 144, pp. 341-378, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.
- [5] Y. Álvarez Criado, «Almacenamiento de energía mediante ciclos termoquímicos de CaO», Universidad de Oviedo, 2016.
- [6] D. Almagro Cabrera, «Departamento de Ingeniería Energética Grupo de Termotecnia», Universidad de Sevilla, Sevilla, 2012.
- [7] A. T. Waterman, «XXI. On the positive ionization from certain hot salts, together with some observations on the electrical properties of molybdenite at high temperatures », *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 33, n.º 195, pp. 225-247, 1917, doi: 10.1080/14786440308635634.
- [8] M. K. Rathod, «Thermal Stability of Phase Change Material», en *Phase Change Materials and Their Applications*, M. Mhadhbi, Ed. IntechOpen, 2018.
- [9] R. Baetens, B. P. Jelle, y A. Gustavsen, «Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review», *Energy Build.*, vol. 42, n.º 9, pp. 1361-1368, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
- [10] N. M. Lopes Soares, «Thermal energy storage with phase change materials (PCMs) for the improvement of the energy performance of buildings», Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, 2015.
- [11] Advanced Cooling Technologies, «Phase Change Materials (PCM) Selection». <https://www.1-act.com/products/pcm-heat-sinks/pcmselection/> (accedido abr. 29, 2020).
- [12] PCM, «Phase Change Materials: Thermal Management Solutions», 2020. <http://www.pcmproducts.net/> (accedido abr. 30, 2020).
- [13] A. F. Regin, S. C. Solanki, y J. S. Saini, «Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, n.º 9, pp. 2438-2458, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.06.009.
- [14] Quality Association PCM, «Medical applications», 2020. <https://www.pcm-ral.org/pcm/en/pcm/pcm-application-areas/medical-applications/> (accedido may 01, 2020).
- [15] T. Junghanss, A. U. Boock, M. Vogel, D. Schuette, H. Weinlaeder, y G. Pluschke, «Phase change material for thermotherapy of Buruli Ulcer: A prospective observational single centre proof-of-principle trial», *PLoS Negl. Trop. Dis.*, vol. 3, n.º 2, pp. 1-7, 2009, doi: 10.1371/journal.pntd.0000380.
- [16] Fibre2Fashion, «PCM in Textiles», 2006. <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/81/pcm-in-textiles> (accedido may 02, 2020).
- [17] A. Fonseca, T. S. Mayor, y J. B. L. M. Campos, «Guidelines for the specification of a

- PCM layer in firefighting protective clothing ensembles», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 133, n.º March 2017, pp. 81-96, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.028.
- [18] T. Vadicherla, S. Parthiban, y C. Sasikumar, «A Novel Thermal Regulatory PCM Based Automotive Interior», *Text. Rev. Mag.*, pp. 1-9, 2012.
- [19] F. L. Tan y S. C. Fok, «Cooling of helmet with phase change material», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, n.º 17-18, pp. 2067-2072, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.04.022.
- [20] S. Ghani, E. M. A. A. ElBialy, F. Bakochristou, S. M. A. Gamaledin, y M. M. Rashwan, «The effect of forced convection and PCM on helmets' thermal performance in hot and arid environments», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, pp. 624-637, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.142.
- [21] E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, S. Vega, y J. Neila, «Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses», *Energy Build.*, vol. 50, pp. 49-62, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.018.
- [22] M. Mofijur *et al.*, «Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview», *Energies*, vol. 12, n.º 16, pp. 1-20, 2019, doi: 10.3390/en12163167.